



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BÁSICAS

Tesis

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

Que para obtener el título de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN QUÍMICA APLICADA

P R E S E N T A:

MÓNICA MARIBEL YZQUIERDO RUIZ

ASESORES:

DR. CARLOS MARIO MORALES BAUTISTA (DACB-UJAT)

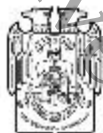
DRA. SONIA ALEJANDRA TORRES SÁNCHEZ (FI-UASLP)

Cunduacán, Tabasco.

Abril 2022



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ciencias
Básicas



DIRECCIÓN

31 de marzo de 2022

ING. MÓNICA MARIBEL YZQUIERDO RUIZ
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN QUÍMICA APLICADA
PRESENTE.

Por medio de la presente y de la manera más atenta, me dirijo a Usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado "EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO" en virtud de que reúne los requisitos para el EXAMEN PROFESIONAL para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Química Aplicada.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE


DR. GERARDO DELGADILLO PIÑÓN
DIRECTOR

C.c.p.- Archivo.

Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx



CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO", de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los 04 días del mes de abril de 2022.

Autoriza

Mónica Maribel Yzquierdo Ruiz

192A27004



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

*Para ustedes, papá y mamá, que son los pilares de mi vida,
los amo mucho.*



AGRADECIMIENTOS

A mis padres que han sido los pilares de mi vida en todo momento y las personas más importantes, a mi madre por siempre preocuparse por mí, sin su apoyo este camino hubiera sido otro. A toda mi familia y sobrinos por hacer mis días felices.

A Dios y al universo por haberme puesto en este camino en el que descubrí que la geoquímica es lo que verdaderamente me gusta, cada día me sorprende y aprendo nuevas cosas de esta bonita rama, y por siempre escuchar mis oraciones.

Mucha gente no lo hace, pero muchas gracias a mí misma, por seguir adelante, aunque tuviera días de ansiedad y tristes, por no dejarme vencer y querer llegar al final.

A mi asesor, Dr. Carlos Mario Morales Bautista por aceptarme como tesista, enseñarme sus conocimientos en la materia de suelos y en la realización de esta tesis.

A mi comité tutorial que con sus retroalimentaciones me han hecho esforzarme. A todos los colaboradores: Dr. David Salvador García Zaleta por su apoyo en el análisis de DRX, a la Dra. Iliana Margarita de la Garza Rodríguez con su apoyo en la realización de metales pesados y a la Dra. Sonia Alejandra Torres Sánchez por compartir sus conocimientos en petrografía.

Gracias CONACyT por el apoyo económico otorgado durante mis dos años de estudio.

Gracias a todos mis compañeros del laboratorio, en especial a Diana Laura Montejo y a los chicos del servicio Gaby, Alejandro y Raquel por apoyarme cuando los necesité. A mis amigas Mayli Montiel y Sandi Daniela por sus buenas vibras.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO GENERAL	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Objetivo general.....	19
1.2.1 Objetivos específicos.....	19
1.3 Hipótesis.....	19
1.4 Justificación.....	20
1.5 Antecedentes.....	22
1.5.1 Cambios geomorfológicos en la llanura aluvial del río Samaria.....	22
1.5.2 Estudios de suelo utilizando Petrografía Microscópica con Luz Polarizada....	24
1.5.3 Estudios de suelo utilizando Difracción de Rayos X.....	25
CAPÍTULO 2. SUELO	27
2.1 Suelo.....	27
2.2 Perfiles del suelo.....	28
2.3 Técnicas analíticas en la evaluación geoquímica ambiental.....	30
2.3.1 Análisis físicos y químicos del suelo para vocación de uso agropecuario.....	30
2.3.1.1 Potencial de hidrógeno (pH).....	30
2.3.1.2 Conductividad eléctrica (CE).....	31
2.3.1.3 Textura del suelo.....	31
2.3.1.4 Densidad aparente (DA).....	31
2.3.1.5 Densidad real (DR).....	31
2.3.1.6 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	31
2.3.1.7 Capacidad de campo (CC).....	32
2.3.1.8 Porosidad (% Po).....	32
2.3.1.9 Materia orgánica (% MO).....	32
2.3.2 Análisis Petrográfico con Microscopio de Luz Polarizada.....	32
2.3.3 Análisis mineralógico con Difracción de Rayos X.....	33
2.3.4 Extracción continua método Soxhlet.....	35
2.3.5 Determinación de metales por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).....	36
CAPÍTULO 3. CONTAMINANTES DEL SUELO	37
3.1 Suelos contaminados por hidrocarburos en México.....	37
3.2 Fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos (SARA).....	39
3.3 Contaminación de metales pesados en suelos.....	40



CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO	42
4.1 Descripción del área de estudio	42
4.1.1 Hidrología superficial y subterránea	45
4.1.2 Geología y geomorfología	46
4.1.3 Suelos predominantes.....	46
4.1.4 Plantaciones y vegetación en el área de estudio.....	47
4.1.5 Ecosistemas.....	48
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA	49
5.1 Materiales	49
5.2 Parámetros físicos y químicos según la NOM-021-SEMARNAT-2000	49
5.2.1 Potencial de Hidrógeno (pH)	49
5.2.2 Conductividad Eléctrica (CE).....	51
5.2.3 Textura.....	51
5.2.4 Densidad Real (DR)	53
5.2.5 Densidad Aparente (DA)	54
5.2.6 Materia orgánica (MO).....	55
5.2.7 Capacidad de Campo (CC)	56
5.2.8 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	57
5.2.9 Porosidad (%Po)	58
5.3 Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) por método Soxhlet.....	58
5.4 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	59
5.5 Difracción de Rayos X (DRX).....	59
5.6 Espectroscopía de Absorción Atómica por Flama	60
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
6.1 Clasificación del suelo	61
6.2 Parámetros físicos y químicos	69
6.2.1 Textura.....	70
6.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH)	75
6.2.3 Conductividad Eléctrica (CE).....	79
6.2.4 Densidad Real (DR) y Densidad Aparente (DA)	82
6.2.5 Análisis de porcentaje de Porosidad (%Po), Materia Orgánica (MO) y Capacidad de Campo (CC).....	84
6.3 Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP).....	86
6.4 Análisis de las fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos (SARA)	92



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



6.5 Análisis por espectroscopía FTIR	93
6.6 Análisis Químico y Mineralógico	97
6.6.1 Difracción de Rayos X.....	97
6.6.2 Descripción Micromorfológica.....	101
6.6.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en suelos	104
6.7 Metales	109
6.7.1 Macronutrientes.....	110
6.7.2 Micronutrientes.....	113
6.7.3 Metales pesados	119
7. Conclusión.....	126
8. Bibliografía.....	129
9. Anexos.....	148

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horizontes del suelo.	28
Figura 2. Estructuras de las fracciones SARA.....	40
Figura 3. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.....	43
Figura 4. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo dentro de la subcuenca del río Samaria en el municipio de Cunduacán, Tabasco.	44
Figura 5. Triángulos de clases texturales (USDA, 2019).....	53
Figura 6. Mapa de ubicación por tipo de suelo.....	62
Figura 7. Muestra P1.	64
Figura 8. Muestra P4.	65
Figura 9. Muestra P7.	66
Figura 10. Muestra del P10.....	67
Figura 11. Muestra del P11.....	68
Figura 12. Clases texturales y calificadores según la WRB (2015), Bunes et al. (2020). 71	
Figura 13. Mapa de distribución textural y tipo de suelo.....	74
Figura 14. Mapa de distribución de pH.....	78
Figura 15. Mapa de distribución de CE.....	81
Figura 16. Distribución de las 23 muestras analizadas para la DA en la zona de estudio. 83	
Figura 17. Distribución de las muestras contaminadas en la zona de estudio.....	91
Figura 18. Espectrograma de FTIR para el P4, P7, P10 y P15.	94
Figura 19. Espectro de fracciones SARA de FTIR de hidrocarburo.....	96
Figura 20. Difractogramas de DRX para el P1, P4, P7, P10 y P15.....	98
Figura 21. Microfotografías de suelo.....	102
Figura 22. Microfotografía y espectrograma del P1 SEM-EDS.....	105
Figura 23. Microfotografía y espectrograma del P4 y P10.....	106
Figura 24. Microfotografía y espectrograma del P7 y P15.....	108
Figura 25. Histograma de macronutrientes (K, Ca, Na y Mg) para el P1, P4, P7, P10 y P15).....	110
Figura 26. Histogramas de los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) contenidos en el suelo para el P1, P4, P7, P10 y P15.	113
Figura 27. Histograma de las concentraciones de metales pesados (Pb, Cr, V, Ni y Ba) para el P1, P4, P7, P10 y P15.	120



Figura 27. Histograma de las concentraciones de metales pesados (Pb, Cr, V, Ni y Ba) para el P1, P4, P7, P10 y P15.	120
Figura 28. Mapeos SEM-EDS del P1.....	148
Figura 29. Mapeos SEM-EDS del P4.....	149
Figura 30. Mapeos SEM-EDS del P7.....	150
Figura 31. Mapeos SEM-EDS del P10.....	151
Figura 32. Mapeos SEM-EDS del P15.....	152
Figura 33. Curvas de calibración para Pb, Cr, Na, Mn, Ca, Zn, K, Cd y Mg	154
Figura 34. Curvas de calibración para Cu, Fe, Ba, Ni y V	155

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas en UTM. ID: Puntos de muestreo.....	42
Tabla 2. Materiales y reactivos usados para el muestreo de suelos.....	49
Tabla 3. Clasificación del pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	50
Tabla 4. Clasificación de la CE según la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	51
Tabla 5. Clasificación de la CIC según la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	57
Tabla 6. Parámetros y condiciones del equipo de DRX.	59
Tabla 7. Tipo de suelo de cada punto.....	61
Tabla 8. Clasificación del tipo de suelo y textura de cinco muestras de suelo.....	63
Tabla 9. Descripción del P1.....	64
Tabla 10. Descripción del P4.....	65
Tabla 11. Descripción del P7.....	66
Tabla 12. Descripción del P10.....	67
Tabla 13. Descripción del P15.....	68
Tabla 14. Resultados de todos los parámetros físicos y químicos.	69
Tabla 15. Clases texturales presentes en las 23 muestras de suelo.....	72
Tabla 16. Clasificación de cada muestra de suelo del pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	75
Tabla 17. Resultados de pH de cada punto con su desviación estándar.....	75
Tabla 18. Clasificación de las muestras de CE según la NOM-021-SEMARNAT-2000....	79
Tabla 19. Resultados de las 23 muestras analizadas para CE con su desviación estándar.	79
Tabla 20. Clasificación de las 23 muestras analizadas de DA según la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	82
Tabla 21. Clasificación del %Po de las 23 muestras analizadas.....	84
Tabla 22. Clasificación de la CC para las muestras analizadas NOM-021-SEMARNAT-2000.	85



Tabla 23. Clasificación de la MO para las 23 muestras de suelo.	85
Tabla 24. Concentraciones de HTP para cada muestra con tres solventes diferentes.	87
Tabla 25. Límites máximos permisibles según la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.	88
Tabla 26. Clasificación de las fracciones SARA.	92
Tabla 27. Grupos funcionales en número de onda encontrados.	94
Tabla 28. Minerales presentes en el suelo con su área superficial.	97
Tabla 29. Información del análisis elemental por medio de SEM-EDS.	104
Tabla 30. Metales analizados por medio de espectroscopia de absorción atómica.	109
Tabla 31. Concentraciones de K, Ca, Na y Mg en mg·kg ⁻¹	110
Tabla 32. Concentraciones de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) en mg·kg ⁻¹	113
Tabla 33. Valores de micronutrientes según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	114
Tabla 34. Límites máximos permisible de diferentes países.	114
Tabla 35. Relación de los metales con la textura, mineralogía y pH.	117
Tabla 36. Concentraciones de metales pesados en mg·kg ⁻¹	121
Tabla 37. Límites máximos permisibles de cinco países.	121
Tabla 38. Relación de los metales pesados con la textura, mineralogía y pH.	122
Tabla 39. Concentraciones y absorbancias para los metales detectados.	153



RESUMEN

Las actividades antropogénicas han causado efectos negativos en el medio ambiente afectando la salud pública, biodiversidad y la fertilidad de los suelos. Siendo este último un factor muy importante debido a que es un recurso natural no renovable y es un factor determinante en la estabilidad de los ecosistemas. Una de las principales fuentes de contaminación son los derrames de productos y residuos del sector petrolero que han ido aumentando en toda la república.

Debido al alto riesgo que esto representa a la salud, en la presente investigación realizamos un estudio de análisis de la calidad de los suelos y de hidrocarburos en una zona aledaña a los pozos petroleros en Samaria, en el municipio de Cunduacán, Tabasco con el fin de determinar si las diversas infraestructuras implementadas para la prevención de inundaciones y derrames recientes han provocado acumulación de contaminantes como los son hidrocarburos y metales pesados en una zona con población marginada.

La metodología se desarrolló mediante un muestreo de horizontes edafológicos los cuales fueron analizados mediante la metodología descrita por la NOM-021-SEMARNAT-2000 para conocer los parámetros físicos y químicos, de igual forma para su análisis se utilizaron técnicas como, Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) para detectar la presencia de metales pesados, las tres siguientes para la descripción mineralógica como: Microscopia Electrónica de Barrido (SEM-EDS), Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopia Petrográfica; Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y extracción continua por método Soxhlet para el caso de los hidrocarburos presentes.

En la descripción de campo observamos la presencia de moteas color pardas a rojizas asociadas a óxidos de Fe y Mg. Con respecto a los parámetros físicos y químicos, encontramos resultados heterogéneos, teniendo textura limosa, franco-limosa, franco-arenosa y arenosa; y pH de fuertemente ácido, moderadamente ácido, neutro y medianamente alcalino.



De acuerdo con los análisis para determinar Hidrocarburos Totales del Petrleo (HTP) encontramos que se extrae mejor con diclorometano en comparación con metanol y hexano. Por otro lado, el análisis de las fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos (análisis SARA) proyectó que el hidrocarburo presente en su mayoría pertenece a los grupos de asfáltenos y aromáticos, siguiendo de resinas y en menor medida de saturados; cabe destacar que se encontraran bandas de absorción de metilos y metilenos en su mayoría en los espectros de FTIR.

En el análisis mineralógico encontramos silicatos, aluminosilicatos, tectosilicatos, nesosilicatos y sulfato de aluminio, en la petrografía abunda el cuarzo y nódulos de Fe. Se encontraron 13 metales (Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, K, V y Zn) los cuales ninguno rebasa el límite máximo permisible, pero, es importante mencionar que el Mn y Ni se rebasa para normas de Estados Unidos, Rusia y Canadá, en SEM-EDS encontramos la presencia de metales como Mo y Ti.



CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO GENERAL

1.1 Introducción

Toda actividad productiva en instalaciones industriales involucrará el manejo, almacenamiento y transporte de productos y residuos, ya sea por vías de comunicación o tuberías, algunos de estos compuestos pueden ser peligrosos y cualquier tipo de vertido accidental puede provocar efectos negativos en el medio ambiente contaminando el suelo, agua y aire, debido a su toxicidad, explosividad e inflamabilidad (CENAPRED, 2014). Los suelos suelen ser receptores de contaminantes por lo que la liberación de estos en su estructura provocaría daños en la salud humana, quedando bioaccesibles, áreas de cultivo y ganadería pueden quedar expuestas a grandes cantidades de contaminantes teniendo como consecuencia la inhalación o ingestión por parte de los seres humanos (Filippelli y Laidlaw, 2010; Reis et al., 2013).

A nivel mundial la fuente de energía más utilizada en las últimas décadas es el petróleo crudo y sus derivados. En México, este recurso natural de insumos se emplea para generar energía eléctrica, además, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene de este; paralelamente a las actividades petroleras se han contaminado suelos, lo que ha contribuido a un desequilibrio físico, químico y biológico que se ve reflejado en la baja producción de alimentos (Ferrera-Cerrato et al., 2006; Galán, 2014; Velásquez Arias, 2017), uno de los estados con mayores adversidades de este tipo es Tabasco, quien hace una década era el primer lugar nacional en producción de crudo y gas natural (Rodríguez-Padilla, 2013; INEGI, s.f.; CENAPRED, 2014; García de León, 2017).

Autores como Gutiérrez y Zavala (2002) señalan que en las tierras bajas del estado de Tabasco han estado sometidas a derrames, ya que existen campos petroleros de extracción de hidrocarburo en el área y que por sus características propias suelen estar saturados, de igual forma indicaron que los diversos suelos tropicales



presentan diferente comportamiento a la acumulación de hidrocarburos y que se debe principalmente a la relación entre los rasgos hidromórficos, la mineralogía y la actividad biológica que presentan los suelos. Este factor representa una gran desventaja para la evaluación de los suelos restaurados o contaminados, y es que las normas ambientales mexicanas no toman en cuenta el tipo de hidrocarburo y el tipo de suelo lo que provoca incertidumbres en la interpretación del nivel de impacto y en los parámetros físicos y químicos del suelo (Morales-Bautista et al., 2016).

Es importante mencionar que a lo largo del río Samaria se construyó en el año 1956 un bordo de defensa el cual junto con las presas Malpaso y Angostura sirvieron para controlar el afluente en temporada de avenidas y disminuir el riesgo de inundación de Villahermosa (Ramos-Hernández, 2008). No obstante, la implementación de bordos provocó un encerramiento en las comunidades aledañas al río Samaria ocasionando que en épocas de avenida los sedimentos quedaran depositados en esta llanura, en el cual es conocido como Depósitos de Llanuras de Inundación (DPI), en el cual, el análisis de la estratigrafía de suelos nos proporciona información sobre la historia sedimentológica y ambiental, aunado a la disminución del caudal por la creación de presas cuenca arriba no hay mucho arrastre de sedimentos y quedan estancados (Miranda-Avilés, 2009).

Para la zona de estudio, Gutiérrez y Zavala (2002) señalan que en el Campo Samaria los suelos se dividen en “Barriales” y “Arenillas”, según la clasificación que manejan los campesinos. Los Barriales (Gleysoles) tienen ligeras a altas concentraciones de hidrocarburo, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre, son susceptibles a inundaciones y la actividad biológica arrastra los hidrocarburos a través de los canales, lo que origina su fragmentación y las condiciones oxidantes para la precipitación de hierro; mientras que las Arenillas (Fluvisoles) presentan una textura media, baja concentración de hidrocarburos, a pesar de estar sometidas a derrames de petróleo, debido a que se encuentran en relieves altos, exentos de inundaciones y tienen un buen drenaje interno que facilita el lavado de hidrocarburos (Zavala, 1993).



Mientras que [Ordoñez y Schroeder \(2014\)](#) determinaron la influencia de la geomorfología en la distribución de hidrocarburos en el bordo derecho del río Samaria, en el cual, identificaron que las zonas bajas inundables (suelo Gleysol) son mayormente susceptibles de provocar una mayor migración de los hidrocarburos en época de avenidas, ya que por las características propias de los hidrocarburos al ser inmiscibles en el agua se desplazan por encima de ellos llegando a los mismos lugares a donde el agua está presente y en el caso contrario en las llanuras altas aluviales se presenta una infiltración sobre una migración, debido a que suelos de esta zona son del tipo Fluvisoles y estos poseen un buen drenaje así que se favorece su infiltración.

Los estudios geoquímicos, representan una mejor perspectiva sobre el grado de contaminación en las diferentes matrices edafológicas, estos pueden ser los estudios de Difracción Rayos X (DRX), que nos indica el tipo de minerales presentes y como tal su comportamiento en la adsorción de contaminantes, así como la Microscopía Petrográfica que nos ayuda a determinar cómo se encuentra distribuidos estos contaminantes en la superficie del suelo y que es un complemento de la DRX.

Un tema de suma importancia es que en las investigaciones ambientales el estudio de los minerales se torna determinante, debido a que la meteorización de estos, ya sea en cualquier sistema terrestre superficial como en los suelos, sedimentos, acuíferos o aguas superficiales, ponen en transporte diversos elementos químicos que pueden ser tóxicos para la salud humana y aunado a que diversos minerales pueden actuar como “secuestradores” de algunas especies contaminantes (metales pesados, radio-nucleidos) debido a que pueden añadirse a la estructura cristalina, adsorberse o absorberse ([Rubio, 2018](#)).

De igual forma, determinar la cantidad de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) permite conocer si la concentración de estos se encuentra por debajo o por encima del Límite Máximo Permisible (LMP); así como las fracciones SARA para conocer



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



la familia de hidrocarburos y sus posibles efectos. Por último, la determinación de metales pesados por el método de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) contribuye en conocer si la concentración está por encima o por debajo del LMP ya que estos poseen efectos sobre la salud humana. Todas estas herramientas geoquímicas combinadas con los parámetros especificados en la NOM-021-SEMARNAT-2000 permiten tener una mayor visión de los cambios que provocan las actividades antropogénicas en este.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



1.2 Objetivo general

Identificar compuestos de origen antropogénico mediante diversas técnicas geoquímicas y comparar con los límites máximos permisibles según las normativas mexicanas con el fin de diagnosticar sus posibles efectos en zonas aledañas al bordo Samaria, Cunduacán, Tabasco.

1.2.1 Objetivos específicos

- I. Establecer un plan de muestreo de sedimentos de las zonas aledañas al área de estudio y definir sus características físicas y biológicas en campo.
- II. Determinar las propiedades físicas y químicas de las muestras según la NOM-021-SEMARNAT-2000.
- III. Cuantificar los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) de los horizontes edafológicos mediante los métodos establecidos en la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 con las modificaciones de Martínez-Chávez et al., (2017), así como las fracciones SARA de los extractos obtenidos de estos.
- IV. Cuantificar la concentración de metales por medio de Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA), para conocer el Límite Máximo Permissible (LMP) según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y conocer las posibles fuentes antropogénicas con base a la litografía del sitio.
- V. Caracterizar la mineralogía de las muestras mediante el análisis de Difracción de Rayos X (DRX) y petrográficos para definir origen de los metales y minerales.

1.3 Hipótesis

Debido a que la zona de estudio se encuentra inmersa en actividades petroleras y agropecuarias, y que el caudal del río ha sido interrumpido por obras de protección para la población y de instalaciones petroleras, se espera que en los sedimentos y suelos inundables analizados contengan contaminantes, tales como, metales pesados, hidrocarburos y otros compuestos orgánicos considerados como tóxicos al medio ambiente y a la salud.



1.4 Justificación

El deficiente manejo y control de las actividades antropogénicas conlleva afectaciones en el ecosistema, esto se debe principalmente a que en las actividades industriales se manejan, almacenan y transportan sustancias químicas, algunas consideradas como peligrosas por su toxicidad, inflamabilidad o reactividad; se ha reportado que al derramarse provocarían un impacto en las condiciones naturales de los suelos. En este sentido, muchos de estos contaminantes son transferidos y almacenados/transformados en los sedimentos y suelos, este fenómeno se favorece si aumenta la corriente de los ríos cuenca arriba y se disminuye la caudal cuenca abajo, sumado a que las condiciones ambientales permiten cambios en las propiedades físicas y químicas tanto de los suelos como de los contaminantes, que podrían resultar en riesgos a la población y la biodiversidad.

Se tiene evidencia de que un desequilibrio en las propiedades químicas y físicas del suelo provoca cambios en el tipo de vegetación y comportamiento hidrológico de una zona, si se almacenan contaminantes la biotransformación y la biomagnificación puede llegar a afectar la salud humana. Esto es más evidente si la población depende directamente de los alimentos que son cultivados en estas zonas, tanto de manera directa como indirecta (consumen animales de traspatio), se ha reportado que el riesgo es mayor si se trata de comunidades vulnerables o grupos minoritarios, ya que su interacción con el sistema es continua en sus actividades cotidianas.

En este contexto, las comunidades inmersas en este tipo de problemas son las aledañas a instalaciones petroleras como baterías de separación y dentro de los bordos de contención de inundaciones, entre ellas Cumuapa y Felipe Galván. Estas localidades, son llanuras de inundación pertenecientes a la cuenca del Río Samaria; en las últimas décadas en estas zonas, se implementaron infraestructuras que ocasionaron el acumulamiento de sedimentos, algunos de ellos con contaminantes como hidrocarburos y metales pesados, aunque también se tiene sospecha que el



hacinamiento y la transición demográfica han permitido el acumulamiento de otros contaminantes, relacionados con residuos sólidos urbanos y biosidas.

En investigaciones realizadas por [Gutiérrez y Zavala \(2002\)](#) y [Trujillo-Narcía et al., \(2012\)](#) establecen que los tipos de suelo son principalmente Gleysol, Vertisol y Fluvisol, aunque la mayoría de la zona ha sido restaurada por lo que los perfiles edafológicos pueden o no ser similares a los reportados sumado a que las condiciones de estiaje e inundaciones provocan cambios en los tipos de reacciones de suelos (óxido-reducción) y contaminantes, sin que hasta la fecha haya un estudio actualizado. Por lo que es importante realizar estudios que actualicen el estado y la cantidad de contaminantes.

Debido a lo anterior y, con el fin de conocer estos indicadores, se propone la siguiente investigación mediante tres vertientes: La primera, el estudio mineralógico por medio de Difracción de Rayos X (DRX) y Petrografía Microscópica para conocer los tipos de minerales presentes y el comportamiento de los contaminantes con los constituyentes del suelo; la segunda, determinar la cantidad de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) para conocer el Límite Máximo Permisible (LMP), así como las fracciones SARA para conocer el tipo de hidrocarburo y sus posibles efectos; por último, la determinación de metales por el método de Espectroscopia Absorción Atómica (EAA) en el cual se determinará la concentración y como está con respecto al LMP para evaluar sus efectos en la salud humana. Es importante mencionar que los análisis geoquímicos son una herramienta novedosa que contribuye en la evaluación ambiental ya que permiten las determinaciones específicas del analito ya que se han encontrado que en muchas de las pruebas normadas presentan incertidumbres por este efecto.



1.5 Antecedentes

1.5.1 Cambios geomorfológicos en la llanura aluvial del río Samaria

En el bajo Grijalva, en 1932 el rompido Samaria disminuyó el caudal del río Carrizal, pero inundó alrededor de 20,000 ha en la Chontalpa (Alberto J. Sánchez et al., 2015). Específicamente en la región denominada como la Chontalpa Chica, desde hace varios años se han presentado cambios geomorfológicos y adaptaciones en las condiciones hidráulicas y sedimentológicas debido a la construcción de las presas como Malpaso, Angostura, Chicoasén y Peñitas, que entre los años 1964 y 1987 han modificado el flujo hídrico y, por lo tanto, el aporte de la composición de los sedimentos (Trejo et al., 2008).

Como se mencionó, los cambios han modificado el sistema hidrológico y con ello, la formación natural o inducida de los llamados “rompidos”, en que la erosión aumenta por causa de los grandes gastos y generan naturalmente las bifurcaciones. En un principio la mayor parte del caudal circulaba por el río Samaria, pero en los últimos años eso se ha invertido, aumentando el gasto del río Carrizal y disminuyendo la sedimentación en el otro afluente (Alatriste, 2019; Trejo et al., 2008).

Por ejemplo, el río Carrizal en 1999 provocó una gran inundación en la ciudad de Villahermosa y se ha reportado que en Octubre de ese año, transportó para un gasto de 1500 m³/s en época de estiaje el 47 % y el Samaria el 53 %; y que en la actualidad se ha incrementado teniendo para gastos menores a 750 m³/s, el 60% para el río Carrizal estas alteraciones en la disminución del caudal para el río Samaria han traído consigo problemas de erosión y sedimentación (Gracia et al., 2003; Sánchez et al., 2001; Alejandro et al., 2002; Rivera et al., 2004).

Por otro lado, es importante mencionar que a lo largo del río Samaria se construyó en el año 1956 un bordo de defensa el cual junto con las presas Malpaso y Angostura sirvieron para controlar el afluente en temporada de avenidas y disminuir el riesgo de inundación de Villahermosa (Ramos-Hernández, 2008).



Posteriormente para dar respuesta al crecimiento urbano debido a que seguían con problemas de inundaciones se creó en el 2003 el Programa Integral Contra Inundaciones (PICI), el cual tenía como objetivo controlar los caudales para salvaguardar la población de la capital tabasqueña, las poblaciones colindantes, zonas agrícolas y ganaderas que son susceptibles a inundarse por el desbordamiento de los ríos Mezcalapa-Samara y Carrizal-Medellín ([Alberto J. Sánchez et al., 2015](#)).

Más tarde, con lo ocurrido en octubre del 2007, se creó el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT) para presentar alternativas a la problemática que enfrentaba el estado a corto, mediano y largo plazo, con investigaciones y estudios en modelación, sistemas de información geográfica y acciones sociales para el control de inundaciones; el PHIT continuó con la construcción y remodelación de bordos de protección ([Alberto J. Sánchez et al., 2015](#); [Alatríste, 2019](#)).

No obstante, la implementación de bordos provocó un encerramiento en las comunidades aledañas al río Samaria ocasionando que en épocas de avenida los sedimentos quedaran depositados en esta llanura de inundación, conocidos como Depósitos de Llanuras de Inundación (DPI), en el cual el análisis de la estratigrafía de suelos nos proporciona información sobre la historia sedimentológica y ambiental ([Miranda-Avilés, 2009](#)). Entonces, podemos concluir que aunado a la disminución del caudal por la creación de presas cuenca arriba, no hay mucho arrastre de sedimentos en la llanura y los desechos en la misma quedan estancados.

De igual forma, [Trejo et al., \(2008\)](#) realizaron un estudio referente al comportamiento fluviomorfológico de la bifurcación del río Grijalva (la cual da lugar a los ríos Carrizal y Samaria) en el cual describieron los cambios morfológicos que esto ha ocasionado provocando daños severos en las poblaciones cuenca abajo y estiman la distribución de los sedimentos por dicho evento, el cual refieren que pueden estar asociados al sistema de presas cuenca arriba debido a que se produjo una inversión del flujo dominante; como resultado de dicha investigación, se revela que el volumen de sedimento de fondo transportado por el río Samaria es mayor pero no existe una



fuerza del flujo que sea lo competentemente fuerte como para mover el sedimento del fondo y ponerlo en suspensión y combinada con la disminución del flujo al final de una creciente produce una importante sedimentación, aunque se ha encontrado que presentan un ajuste constante, donde el río Samaria se aprecia un proceso de azolvamiento, lo que puede provocar desbordamientos y avulsiones.

1.5.2 Estudios de suelo utilizando Petrografía Microscópica con Luz Polarizada

En los estudios petrográficos se preparan láminas delgadas pulidas con el fin de ayudar a describir las características de los minerales presentes en los suelos, se obtienen fotomicrografías en las que podemos describir la morfología presente en los minerales y cristales, así como sus propiedades (Reyes-Salas et al., 2017). Es importante destacar el estudio que realizaron Gutiérrez y Zavala (2002) en el que señalan que la micromorfología nos ayuda a entender el comportamiento de la acumulación de hidrocarburo en el suelo dándonos información de cómo los hidrocarburos se distribuyen y como se relacionan con la mineralogía, los rasgos hidromórficos y la actividad biológica que son los otros componentes presentes en el suelo.

Ellos describieron las secciones delgadas de los dos suelos presentes (Gleysoles y Fluvisoles) en el campo petrolero Samaria haciendo énfasis en la descripción de los agregados esferoidales, materia orgánica, poros, excremento, minerales de la fracción arena y arcillosa, pedorrasgos de hierro y los atributos que dejan los hidrocarburos. Dentro de los rasgos que pudieron observar en las láminas fueron hipo- revestimientos de óxidos de hierro cristalinos que están relacionados con los organismos como las lombrices y los canales que forman las raíces de las plantas, y nódulos amiboidales en la masa basal del suelo, por ejemplo en los suelos Gleysoles presenta rayas verticales de color naranja combinadas con una masa basal de color verde olivo, esto se debe a que las raíces penetraron los sedimentos llenos de agua lo que ocasionó que se formaran macroporos y por ende le da



continuidad al aire, esto provoca un ambiente oxidante y la precipitación de hierro (Gutiérrez y Zavala, 2002).

Uno de los minerales que forma el óxido de hierro en condiciones de hidromorfismo es la lepidocrocita el cual se presenta en forma de moteas, concreciones y bandas de color anaranjado. Con respecto a los rasgos formados por la acumulación de hidrocarburo fueron nódulos de impregnación de forma irregular en la masa basal del suelo, estas características presentes se reflejan en los 23 cm de profundidad en cual la actividad biológica juega un papel muy importante en la homogenización de este suelo (Gutiérrez y Zavala, 2002).

1.5.3 Estudios de suelo utilizando Difracción de Rayos X

La Difracción de Rayos X (DRX) es la técnica más utilizada para la identificación de minerales presentes en las rocas, suelos y sedimentos. La mineralogía e identificación de arcilla en suelos hizo que Alvarado et al., (2014) enfatizaran en la mineralogía de arcillas tipo esmectita y kandita asociadas a óxidos e hidróxidos de Fe y Al, mediante el análisis de patrones de difracción de rayos x se pueden identificar los principales tipos de arcillas esmectíticas e interestratificadas, por ejemplo, la metahalloysita que posee pequeños cristales y capas interestratificadas con diferentes estados de hidratación.

Autores como Gonzales et al., (2014) analizaron el estado de meteorización y sus efectos en las propiedades mecánicas de un suelo tropical, la técnica de DRX mostró una cantidad de cuarzo, presencia de caolinita, lo que podría explicar la estabilidad del suelo en presencia de agua y también minerales propios del tipo de suelo como la gibsita y hematita. Ellos deducen que las partículas finas permitieron que el suelo ha sido afectado por procesos de meteorización.

Además, Reyes-Salas et al., (2017) realizaron un estudio mineralógico de fulguritas en suelo calcáreo, ya que estas suelen ser las menos conocidas debido a la desintegración en el suelo donde se forman; utilizando la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) para conocer las fases mineralógicas de nueva formación presentes



en el vidrio de la fulgurita, en el cual se pulverizó en mortero de ágata para obtener partículas del tamaño de 50 y 30 micrometros, se logró identificar la fase amorfa correspondiente al vidrio, calcita, cuarzo, feldespatos y fases de cristobalita.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



CAPÍTULO 2. SUELO

2.1 Suelo

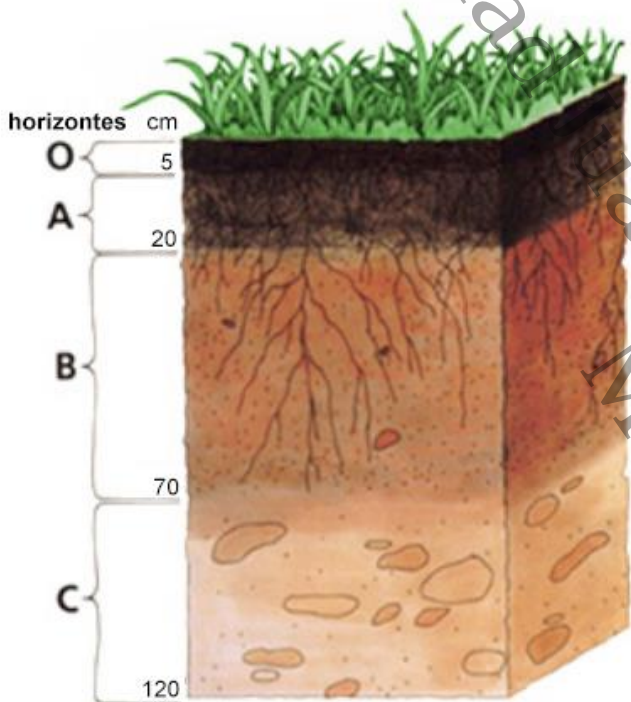
El suelo es la capa superior de la corteza terrestre formada por la acumulación heterogénea de agregados de minerales no consolidados producto de la meteorización de rocas preexistentes que pueden contener agua, aire y materia orgánica, por lo que los suelos sostienen la vida vegetal ([Rojas Caballero y Paredes Ángeles, 2013](#)).

Según [López \(2006\)](#) nos menciona que este recurso natural es la fina capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que está situada en el límite entre la atmósfera y la zona continental de la corteza terrestre. De tal manera, que la atmósfera, corteza y suelo interactúan para proporcionar a los seres vivos los recursos que necesitan. Otros autores lo conceptualizan como una delgada lámina de una mezcla de productos de meteorización y materia orgánica la cual están recubiertas la mayoría de las rocas de la superficie de la Tierra ([White, 2013](#)).



2.2 Perfiles del suelo

Normalmente el suelo tiene una secuencia de capas que constituye un perfil, la naturaleza de estas varía y depende del clima, vegetación y la naturaleza de la roca subyacente; por lo cual nunca serán idénticos dos perfiles de suelo sin embargo existe una descripción general de un perfil de suelo ideal, White (2013) lo describe en la figura 1.



- Horizonte O
Es la capa superior y capa de hojarasca sobre la superficie del suelo.
- Horizonte A
Formado en la superficie, con mayor contenido de materia orgánica que los horizontes de abajo.
En las regiones tropicales la descomposición orgánica es lo suficientemente rápida lo que ocasiona que el Fe y el Al se acumule como óxidos hidratados e hidróxidos.
- Horizonte B
Es más rico en arcillas, pero más pobre en materia orgánica que el horizonte anterior.
- Horizonte C
Recubre el lecho de roca. Consiste en roca en parte meteorizada, a menudo solo fragmentada.

Figura 1. Horizontes del suelo.



- Horizonte O. Es la capa superior del suelo y consiste relativamente de material orgánico cuyo estado de descomposición se incrementa hacia abajo. Este horizonte se desarrolla mejor en suelos anegados empobrecidos en O_2 lo que hará que la descomposición sea lenta y en regiones arboladas.
- Horizonte A. También llamada zona de re-movilización y su espesor varía desde unos centímetros a un metro o más. Esta capa contiene una variedad de minerales y una fracción orgánica sustancial. Las reacciones de meteorización de esta capa producen una solución de suelo rico en sílice, álcali y cationes de tierras alcalinas que percolan hacia abajo en la capa subyacente.

En las regiones tropicales la descomposición orgánica es lo suficientemente rápida y completa que hay poco ácido orgánico soluble disponible para formar compuestos y transportar el Fe y Al, con lo que la podsolización (transporte descendente del Fe y Al) no puede ocurrir, lo que ocasiona que el Fe y el Al se acumule en este horizonte como óxidos hidratados e hidróxidos. Donde el lixiviado es particularmente fuerte, es importante mencionar que el horizonte A puede tener por debajo una delgada capa blanquecina fuertemente lixiviada conocida como Horizonte E enriquecida con minerales fuertes como el cuarzo.

- Horizonte B. Conocida como zona de acumulación o deposición. Es más rico en arcillas, pero más pobre en materia orgánica que el horizonte anterior. Las sustancias lixiviadas del horizonte A se depositan en este horizonte, el Fe y el Al llevados hacia abajo como compuestos orgánicos precipitan aquí como óxidos hidratados e hidróxidos, y pueden reaccionar con otros componentes en la solución del suelo formando otros minerales secundarios como las arcillas. En las regiones tropicales donde la meteorización es intensa y ha continuado durante millones de años en ausencia de perturbaciones como la glaciación, el perfil del suelo puede alcanzar los 100 m de espesor. Los cationes de base son lixiviados casi completamente en los suelos tropicales



dejando una tierra dominada por minerales como la caolinita, gibsita y óxidos de Fe, tales suelos se denominan laterías.

- Horizonte C. Recubre el lecho de roca. Consiste en roca en parte meteorizada, a menudo solo fragmentada, regularmente consiste en saprolita, roca en la que los silicatos rápidamente meteorizables han sido reemplazados in situ enteramente por arcillas y óxidos, pero las texturas y estructuras están a menudo conservadas para que pueda ser reconocida la naturaleza del material original. En las llanuras de inundación del río generalmente se desarrollan a partir del aluvión en lugar del lecho de roca subyacente.

2.3 Técnicas analíticas en la evaluación geoquímica ambiental

2.3.1 Análisis físicos y químicos del suelo para vocación de uso agropecuario

El análisis fisicoquímico del suelo se llevará a cabo por medio de los parámetros de la NOM-021-SEMARNAT-2000 la cual tiene como objetivo establecer las técnicas de muestreo, describir las características del suelo y los efectos que pueden ocasionar los contaminantes en este. Los métodos analíticos que se utilizaran para evaluar las propiedades según la norma son:

2.3.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino (FAO, 2019). La determinación de pH de suelo se lleva a cabo por medio de la evaluación electrométrica del pH, esta se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante un electrodo que tiene una membrana que es sensitiva al H, en los suelos se mide por medio de un potenciómetro (pH-metro) en una mezcla de suelo/agua 1:2.



2.3.1.2 Conductividad eléctrica (CE)

Es la propiedad que tienen los materiales de permitir el flujo de corriente eléctrica a través de ellos. La CE de una solución electrolítica depende de la concentración total de iones presente en el agua, su valencia y de la temperatura. Este parámetro se determina por medio del extracto de la pasta saturada y su comparativa con un electrodo de referencia.

2.3.1.3 Textura del suelo

Este parámetro determina la proporción de partículas de tamaño arena, limo y arcilla presentes en el suelo, las cuales al combinarse forman clases texturales. Se mide con el densímetro Bouyoucos y el termómetro. Para determinar de textura se calcula mediante las siguientes fórmulas y los resultados se interpretan por un cuadro de textura donde nos presenta las diferentes clases texturales según el triángulo de textura propuesto por [USDA \(s.f.\)](#).

2.3.1.4 Densidad aparente (DA)

Es la masa por unidad de volumen, este parámetro describe la compactación del suelo y la relación existente entre el sólido y los espacios porosos, varía con otros parámetros, con la textura y el contenido de materia orgánica ([Keller & Håkansson, 2010](#); [Taboada & Álvarez, 2008](#)).

2.3.1.5 Densidad real (DR)

Puede definirse como la relación entre la masa (pesando directamente el suelo) y el volumen (calculando la masa y la densidad del agua) de una cierta cantidad de suelo, omitiendo el volumen de porosidad.

2.3.1.6 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La [FAO \(2019\)](#) la define como una medida de cantidad de cargas negativas que están presentes en las superficies de los minerales y demás componentes orgánicos del suelo, como la materia orgánica o arcilla presente y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, entre otros),



estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en el suelo o liberados por las raíces de las plantas. Este indicador se determina a través de la pasta saturada y su extracto con agentes quelantes, y su determinación en espectrofotometría UV-VIS.

2.3.1.7 Capacidad de campo (CC)

Es la capacidad que tiene el suelo de retener agua a través de la saturación, la importancia de este parámetro es que a través de esta se puede conocer la lámina de riego y el punto de marchites permanente (cantidad de agua necesaria para que la planta sobreviva). Se determina por medio del método de la columna de Colman.

2.3.1.8 Porosidad (% Po)

Este parámetro se relaciona con la capacidad de campo, densidad aparente y textura, su importancia radica en la capacidad que tiene el suelo de dejar fluir agua o demás sustancias, así como la respiración y la transferencia de CO₂.

2.3.1.9 Materia orgánica (% MO)

Este parámetro determina la actividad biológica presente en el suelo y da información de los nutrientes relacionados con los organismos y para las plantas. Se determina a través de la oxidación y digestión Kjeldahl.

2.3.2 Análisis Petrográfico con Microscopio de Luz Polarizada

La petrografía es definida por el [Servicio Geológico Mexicano](#) (SGM) en el 2017 como una rama de la petrología que se encarga de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de láminas delgadas, clasificándola según su textura y composición mineralógica, revela la relación que existe entre los cristales, lo que ayuda a conocer su naturaleza y origen de esta. La utilidad del microscopio de luz polarizada es determinante e importante para el estudio de minerales y para determinar las propiedades ópticas de los cristales; su función primaria es suministrar una imagen aumentada de un objeto colocado en una platina.



Este microscopio también puede ser llamado microscopio petrográfico porque se utiliza para estudiar las rocas, sedimentos y suelos; el estudio de la micromorfología de suelos se centra en la descripción e interpretación de secciones de laminadas delgadas en las que podemos observar las relaciones de textura (resultado de su origen y las transformaciones que pueden experimentar los minerales por las condiciones ambientales), identificar los minerales presentes y las propiedades ópticas. Como se mencionó anteriormente, el microscopio petrográfico determina las propiedades ópticas, lo cual se refiere a las propiedades físicas que describen el comportamiento de la luz al cruzar un mineral, ya sea luz transmitida o luz reflejada; las propiedades son el tamaño de grano, forma, hábito, color, pleocroísmo, exfoliación, alteraciones. Gracias a la microscopía óptica de cortes delgados se puede comprender la complejidad, la evolución y el funcionamiento de la organización edáfica (Klein y Hurlbut, 1999; Loaiza et al., 2015).

2.3.3 Análisis mineralógico con Difracción de Rayos X

El nacimiento de la mineralogía es tan antiguo como la civilización humana, el arte mineralógica fue practicada por hombres primitivos utilizando los pigmentos de minerales para las pinturas rupestres, hasta el año 1556 fue tomada como una ciencia debido a la publicación del libro De Re Metallica escrito por Georgius Agricola. Podemos decir que la mineralogía es el estudio de los minerales, su composición química, estructura interna (cristales) y morfología (Klein y Hurlbut, 1999). Ahora bien, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2017) define la mineralogía como la ciencia que trata del estudio de las especies inorgánicas llamadas minerales, abarcando su origen, ocurrencia, propiedades y morfología.

La definición de mineral puede ser contradictoria debido a que diferentes ciencias como la química y geología puede variar. Klein y Hurlbut (1999) en su libro Manual de Mineralogía describieron un mineral como un sólido homogéneo por naturaleza aunque igual hay sustancias sintetizadas en el laboratorio, se forman regularmente por procesos inorgánicos, pero es importante mencionar que hay pocos formados por procesos orgánicos llamados minerales biogénicos, tienen una composición



química definida lo que implica que pueden representarse por una fórmula química específica pero generalmente no es fija, ya que algunos minerales no tienen una composición perfectamente definida, y por último, deben tener una disposición atómica ordenada, lo que se refiere a átomos ordenados según un modelo geométrico regular por lo que los minerales son cristalinos.

La Difracción de Rayos X (DRX) ha sido la técnica más utilizada para el estudio de los sólidos cristalinos, su principal aplicación es el estudio de la estructura y microestructura de materiales y el instrumento utilizado para su estudio es el Difractómetro de Rayos X. El fenómeno resultado de la interacción de radiaciones coherentes con una distribución periódica de centros dispersores se llama difracción y como resultado de este fenómeno se produce una distribución no uniforme de las intensidades dispersadas y distribución espacial que se conoce como patrón de difracción, el cual contiene información sobre la estructura y microestructura de la muestra (Cruz-Gandarilla et al., 2005).

Hay una estrecha relación entre el patrón de difracción, la estructura y microestructura de los sólidos cristalinos por lo que hay una clasificación de estos patrones, cuyos nombres son: patrones de difracción de monocristales y patrones de difracción de policristales; estos conceptos son relativos a la técnica utilizada y depende de la zona excitada, por ejemplo en un microscopio de transmisión los cristales con dimensiones de 10 μm se comportarían como monocristales, en cambio si este mismo material se estudia en DRX se comportará como un policristal (Cruz-Gandarilla et al., 2005).



2.3.4 Extracción continua método Soxhlet

La extracción con equipo Soxhlet se puede definir como la acción de separar con un líquido una fracción específica de una muestra, esta se puede realizar desde los tres estados de la materia: sólido-líquido, líquido-líquido y gas-líquido; de forma sencilla el Soxhlet realiza varias extracciones de manera automática con el mismo solvente a utilizar, este se evapora y condensa llegando siempre de manera pura a la muestra (Núñez, 2008). Este método se fundamenta de la siguiente manera:

- I. Colocación del solvente.
- II. Ebullición del solvente, este se evapora y llega hasta un condensador a reflujo.
- III. El condensado cae sobre un recipiente que contiene un cartucho con la muestra en su interior.
- IV. El solvente cubre el cartucho hasta un punto en que se produce el reflujo que hace que regrese el solvente al matraz.
- V. Se vuelve a producir este proceso.

Según Martínez-Chávez et al., (2017) la extracción es la transferencia de un soluto de un disolvente a otro y la extracción continua sólido-líquido, que es el método Soxhlet, tiene como fundamento el transporte de un analito de una matriz, para determinar cuanta cantidad de HTP los solventes más utilizados son el hexano (el que indica la norma) y el diclorometano, ya que diversos autores como Adams et al., (2008) y Morales-Bautista et al., (2016) sugieren que el diclorometano tiene mayor eficiencia, y que para suelos arenosos extrae en menos horas que el hexano.



2.3.5 Determinación de metales por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)

Isaac Newton fue uno de los primeros pioneros en la espectroscopia en sus estudios para observar el comportamiento de la luz cuando atraviesa un prisma, por otra parte J.F. Herschel pudo demostrar que las sales de diferentes metales originan diferentes coloraciones a la flama cuando las sales se ponen en contacto con ésta (sales de sodio dan una flama de color amarillo, de potasio color violeta, de calcio color naranja, entre otras), esto ayudo a poder identificar los metales presentes en las sales (Rocha Castro, 2000).

Fue hasta años más tarde que Kirschhoff y Bunsen en el año de 1859 hicieron incidir la luz colorida que produjo el metal en la flama en un depósito óptico que aparta la radiación emitida por el metal de la luz solar, a este instrumento se le fue llamado espectroscopio que significa observación del espectro, de igual forma se observó que cada metal emitía radiación de diferente color y que presentaba líneas que aparecían líneas en diferentes posiciones en el campo de observación , y que la intensidad de la línea está estrechamente relacionada con la intensidad de la concentración del elemento en solución. Cabe destacar que el desarrollo de este método para el análisis químico fue hasta 1952 que se tuvo el primer equipo en forma comercial para la cuantificación de metales (Rocha Castro, 2000).

La espectroscopia de absorción atómica en flama se clasifica como una de las tres clases de Espectroscopia Atómica denominada como EAA y tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda, esta radiación es absorbida por átomos que tengan niveles energéticos cuya discrepancia en energía pertenezca en valor a la energía de los fotones incidentes (los fotones absorbidos están determinados por la de ley de Beer) (Skoog et al., 2008; Rocha Castro, 2000).



CAPÍTULO 3. CONTAMINANTES DEL SUELO

3.1 Suelos contaminados por hidrocarburos en México

El petróleo es la fuente de energía más utilizada en el mundo y lo seguirá siendo en las próximas décadas (Rodríguez-Padilla, 2013). En México es la principal fuente de insumos para generar energía eléctrica, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene del petróleo, en el 2005 México ocupaba el segundo lugar en el continente americano en producción de petróleo crudo y Tabasco fue el primer lugar nacional en producción de crudo y gas natural (INEGI, s.f.), por lo que aumenta el riesgo a posibles derrames.

Toda actividad productiva en instalaciones industriales implica el manejo, almacenamiento y el transporte por las vías de comunicación o por tuberías de sustancias químicas, muchas de estas son peligrosas debido a sus propiedades de toxicidad, inflamabilidad, explosividad, reactividad y corrosividad; los accidentes con sustancias químicas pueden tener efectos negativos sobre la salud de la población, en el ambiente como la contaminación del suelo, aire y agua. La contaminación del suelo produce un desequilibrio físico, químico y biológico en las plantas, animales y en el ser humano. Las actividades petroleras y de obtención de los derivados del petróleo en diversas regiones del país han contribuido a una severa contaminación por hidrocarburo que han penetrado al suelo y contaminando cuerpos de agua (CENAPRED, 2014).

En este sentido, Gutiérrez y Zavala (2002) señalan que en las tierras bajas del estado de Tabasco han estado sometidas a derrame de petróleo ya que existen campos petroleros de extracción de hidrocarburo en el área y que por sus características propias suelen estar saturados, de igual forma indicaron que los suelos tropicales presentan diferente comportamiento a la acumulación de hidrocarburos y que se debe a la relación entre los rasgos hidromórficos, la mineralogía y la actividad biológica que presentan los suelos, de las áreas con mayores afectaciones en este estado son las del Activo Cinco Presidentes, ya que



en los últimos años registra la mayor cantidad de derrames de petróleo en suelos que han reducido el desarrollo del pastizal y la vegetación natural ([Zavala-Cruz et al., 2005](#)).

Sumado a la anterior, existen investigaciones en otras zonas similares, como las del Campo Samaria que indican que los suelos se dividen en “Barriales” y “Arenillas”, según la clasificación que manejan los campesinos. Los Barriales (Gleysoles) tienen ligeras a altas concentraciones de hidrocarburo, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre, son susceptibles a inundaciones y la actividad biológica arrastra los hidrocarburos a través de los canales, lo que origina su fragmentación y las condiciones oxidantes para la precipitación de hierro; mientras que las Arenillas (Fluvisoles) presentan una textura media, baja concentración de hidrocarburos, a pesar de estar sometidas a derrames de petróleo, debido a que se encuentran en relieves altos, exentos de inundaciones y tienen un buen drenaje interno que facilita el lavado de hidrocarburos ([Zavala, 1993](#)).

Algunas de las desventajas presentadas en la evaluación de los suelos restaurados o contaminados es que las normas ambientales no son compatibles una con otra, por ejemplo, la legislación para determinar el nivel de impacto de los hidrocarburos posee muchas incertidumbres debido a que no considera el tipo de suelo y el tipo de hidrocarburo por lo que al determinar parámetros como capacidad de campo que conllevan el uso de agua, se han realizado lecturas erróneas ya que los suelos con hidrocarburos pueden presentar repelencia al agua ([Marín-García et al., 2016](#)); es por esto que, los estudios geoquímicos, representan una mejor perspectiva sobre el grado de contaminación en las diferentes matrices edafológicas, estos pueden ser los estudios de Difracción de Rayos X (DRX, que nos indica el tipo de minerales presentes y como tal su comportamiento en la adsorción de contaminantes) así como la Petrografía Microscópica que nos ayuda a determinar cómo se encuentra distribuidos estos contaminantes en la superficie del suelo.



3.2 Fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos (SARA)

Los hidrocarburos cuentan con cuatro grupos característicos los cuales son: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos; mejor conocidos como fracciones SARA (figura 2). Este análisis es un método cromatográfico el cual se lleva a cabo utilizando diferentes solventes y adsorbentes, este análisis divide el crudo en componentes de acuerdo con su polaridad (Speight, 1999; Fan et al., 2002; Kharrat et al., 2007; Meza-Ávila et al., 2016;). Como había mencionado se dividen en cuatro grupos (Ashoori et al., 2012; Fernández Salgado, 2017; Martínez Barrios et al., 2020):

- **Saturados**, llamados comúnmente como parafinas. Son hidrocarburos con cadenas ramificadas o lineales, son no polares constituidos por hidrogeno y carbono unido por enlaces simples, no tienen enlaces dobles ni triples y son la fracción más ligera del crudo.
- **Aromáticos**, son hidrocarburos cíclicos poliinsaturados, estos contienen uno o más anillos aromáticos ligados a cadenas alifáticas. Muchos de estos pueden causar graves problemas al medio ambiente y a la salud pública.
- **Resinas**, estos hidrocarburos presentan una polaridad alta y son solubles en alcanos ligeros (*n-pentano* o *n-hexano*), para su separación se necesitan de los disolventes más polares. Contiene anillos aromáticos y estructuras nafttécnicas y alquílicas.
- **Asfáltenos**, este tipo de fracción se puede definir como la fracción del petróleo insoluble en *n-heptano* o *n-pentano* pero soluble en tolueno, contiene un peso molecular alto, son polares y contiene aromáticos polinucleares. Se presentan en forma de micelas, se rodean de moléculas de menor tamaño (resinas) las cuales se rodean de otras moléculas (saturados y aromáticos) para constituir una fase continua.




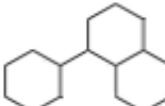
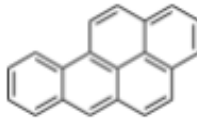


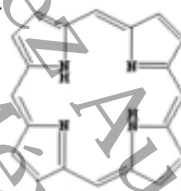
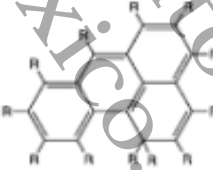
Fracción.	Estructura química.	Tipo.
Saturados.		Lineales.
		Aromáticos.
Aromáticos.		Bencénicos.
		Nafténicos.
		Nafténicos monosustituídos.
Resinas.		Porfirinas.
Asfaltenos.		

Figura 2. Estructuras de las fracciones SARA.

3.3 Contaminación de metales pesados en suelos

Los estudios de suelos contaminados por metales pesados cada vez se les da una mayor relevancia debido a que es necesario saber el comportamiento que tienen cada uno de estos en las diferentes capas del suelo, de igual forma sirven para dar una línea del tiempo del grado de contaminación de cada extracto existente en los suelos y poder mencionar si se debe a una fuente antropogénica moderna o antigua. Y como mencionan [Kabata Pendias y Szteke \(2015\)](#), [Fei et al., \(2018\)](#) y [Barsova et al., \(2019\)](#) la contaminación ambiental por metales pesados afecta a todos los seres vivos por lo que es un problema grave que abarca todos los demás sistemas



terrestre, afectando indirectamente en el desarrollo de los países, debido que el recurso suelo sostiene la vida en el planeta e interactúa con todas las esferas existentes (litosfera, bioesfera, atmosfera, etc).

Un tema de suma importancia es que en las investigaciones ambientales el estudio de los minerales se torna determinante, debido a que la meteorización de estos, ya sea en cualquier sistema terrestre superficial como en los suelos, sedimentos, acuíferos o aguas superficiales, ponen en transporte diversos elementos químicos que pueden ser tóxicos para la salud humana y aunado a que diversos minerales pueden actuar como “secuestradores” de algunas especies contaminantes (metales pesados, radio-nucleidos) debido a que pueden añadirse a la estructura cristalina, adsorberse o absorberse (Rubio, 2018).

Los suelos suelen no ser tan complejos como se piensa, cada horizonte tiene una función diferente, donde los factores fisicoquímicos de migración cambian drásticamente y aumentan las concentraciones de elementos químicos, por lo que es necesario hacer comparativas con diferentes tipos de suelos y en los diferentes horizontes de este (Semenkov et al., 2020), Vonyanitskii et al., (2013) menciona que los metales asociados a derrames de hidrocarburos son Ba, Ni, Pb y Zn. Franciškovic-Bilinski et al., (2021) y Semenkov et al., (2020) mencionan que cada país tiene sus estándares para suelos, pero en los últimos años se están haciendo investigaciones para conocer la función de cada horizonte, cómo funciona el sistema de transporte y el comportamiento con cada componente del suelo.



CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO

4.1 Descripción del área de estudio

Los puntos de muestreo se encuentran ubicados a lo largo del río Samaria, comprendiendo las localidades del Ejido San Pedro Cumuapa 1ra Sección con coordenadas UTM 484206.72 m E y 1991922.17 m N ubicado en el municipio de Cunduacán y en la Ranchería Felipe Galván con coordenadas 493861.76 m E y 1990837.30 m N ubicada en el municipio de Centro, ambos pertenecientes al estado de Tabasco. Se eligieron 23 puntos para realizar el muestreo (tabla 1), el tipo de muestreo se hizo en forma de zig-zag a lo largo del río Samaria, se puede observar su distribución en el mapa de ubicación (Figura 3).

Tabla 1. Coordenadas en UTM. ID: Puntos de muestreo.

ID	ESTE (m E)	NORTE (m N)	ID	ESTE (m E)	NORTE (m N)	ID	ESTE (m N)	NORTE (m N)
1	488318	1994047	9	484327	1993899	17	486480	1990006
2	487758	1993862	10	493867	1990737	18	486481	1990012
3	486659	1994367	11	494920	1989755	19	486482	1990009
4	485364	1993882	13	494562	1988838	20	486934	1989892
5	484804	1994141	13	485147	1989890	21	489985	1989945
6	482439	1993996	14	485155	1989943	22	489996	1989885
7	482790	1993920	15	484108	1989970	23	489996	1989885
8	483903	1993948	16	484123	1989904			

Los puntos fueron seleccionados en áreas específicas de la subcuenca del río Samaria que tienen un impacto debido a las actividades agrícolas e industriales (petroleras) que se suscitan, por ejemplo, en la figura 4 se pueden observar una gran cantidad de pozos petroleros que rodean la zona. La profundidad de cada muestreo se hizo desde el primer horizonte hasta el manto freático, se midieron los parámetros en campo y se anotaron en una bitácora, al igual que la descripción de la zona.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANтропоGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL TABASCO.



BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN,

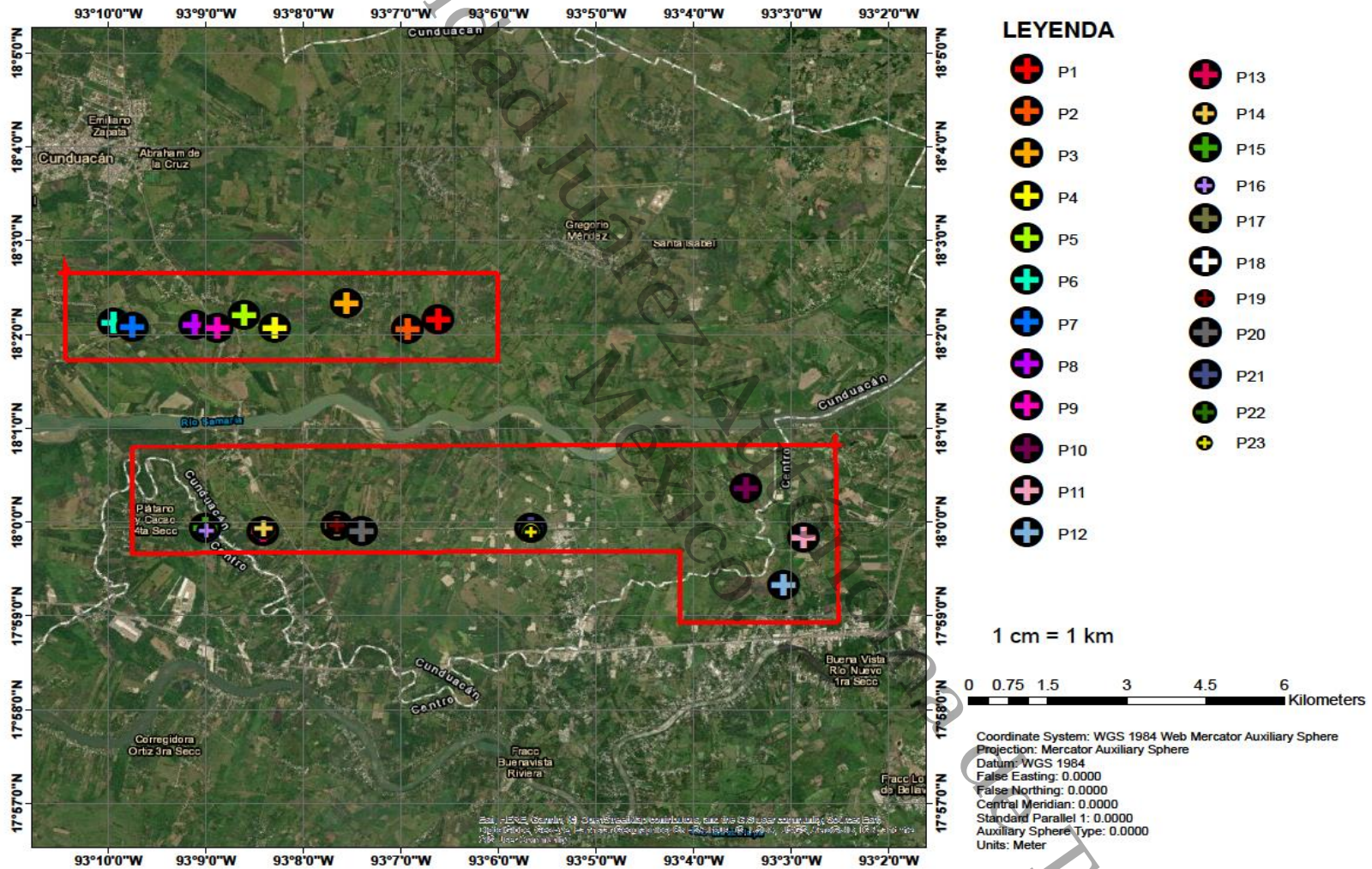


Figura 3. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.

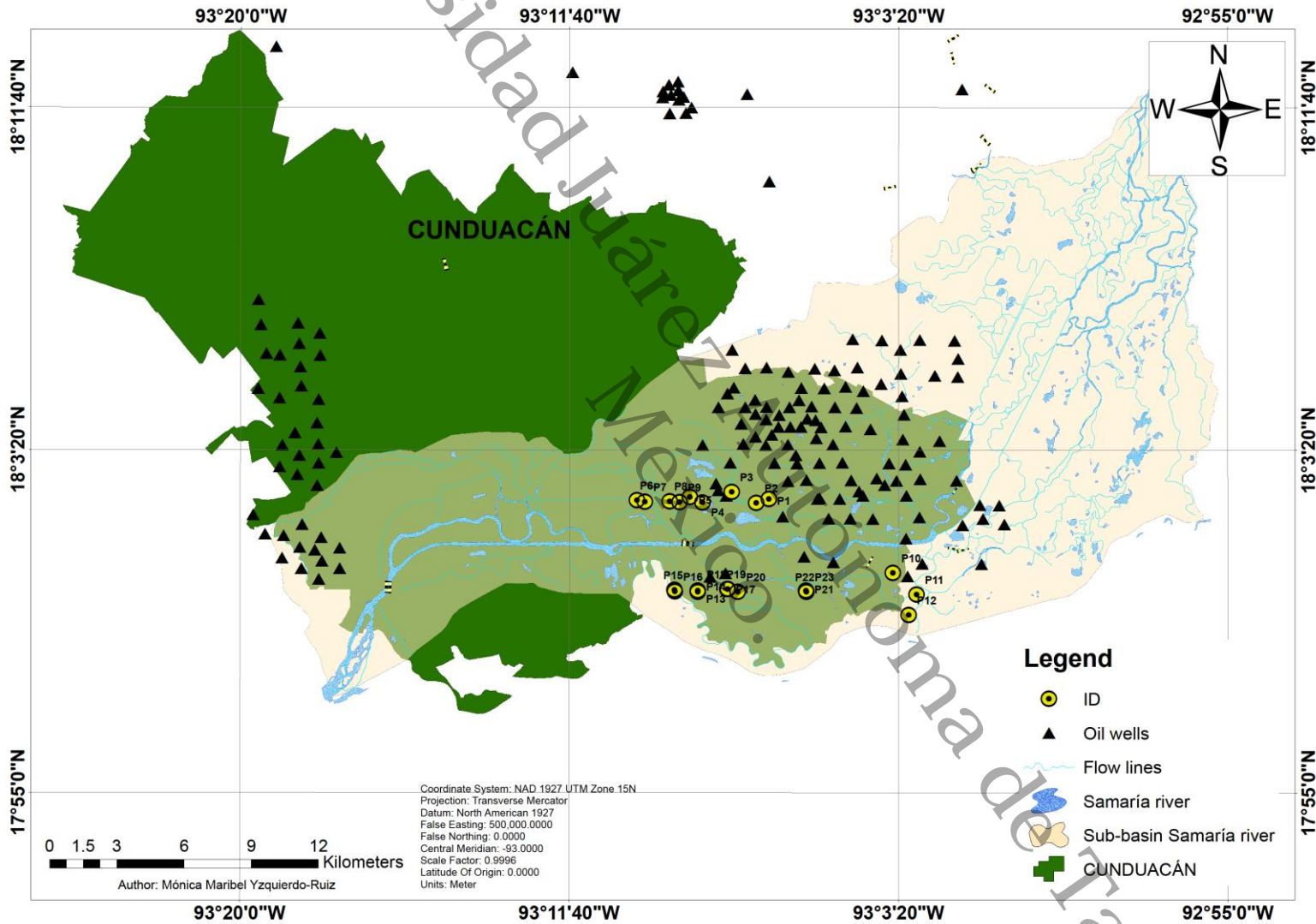


Figura 4. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo dentro de la subcuenca del río Samaria en el municipio de Cunduacán, Tabasco.



4.1.1 Hidrología superficial y subterránea

En el estado de Tabasco la mayoría de los municipios están cerca de una corriente fluvial por lo que la mayoría del estado es propensa a inundarse, lo que conlleva al transporte y acumulación de sedimentos (Martínez-Assad et al., 2011). Tabasco se encuentra dentro de la región hidrográfica No. 30 Grijalva-Usumacinta, pero esta se divide en cuatro cuencas: No.29A Río Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona, No.30A Río Usumacinta, No.30C Laguna de Términos y la No.30D Río Grijalva-Villahermosa.

Siendo esta última la cuenca donde se encuentra nuestra área de estudio en el bajo Grijalva, a su vez se divide en varias subcuencas, pero la que pertenece al río Samaria es la denominada Subcuenca del río Samaria. El río Samaria pasa por la zona de estudio y es el que divide los perfiles de muestreos, se forma por una bifurcación del río Grijalva el cual le da origen junto al río Carrizal, el cual empieza en el municipio de Huimanguillo y cruza los municipios de Cárdenas, Cunduacán y Nacajuca, y termina en su desembocadura con el río Gonzales (Martínez-Assad et al., 2011).

Con respecto a la hidrología subterránea la unidad litológica del subsuelo está constituida por material de origen aluvial, presenta arcillas y materiales de relleno de granulometría arcillo-arenoso con estratificación cruzada, los acuíferos se comportan como semiconfinados o confinados y presentan permeabilidad media; la calidad del agua de los acuíferos es dulce y la clase química es mixta bicarbonatada (CONAGUA, 2011).



4.1.2 Geología y geomorfología

La zona de estudio se encuentra ubicada en la llanura costera del golfo sur, una de las cuatro llanuras existentes en México, la cual se caracteriza por una elevación promedio de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm) y se dice que tiene su origen por el arrastre de material debido a las redes hidrológicas durante miles de años, dicha llanura es una continuación del declive de las Sierras Madres y la Sierra de Chiapas (Alatríste, 2019).

En estudios anteriores como el de Zavala-Cruz et al, (2016) nos dice que la unidad geomorfológica de la zona es una llanura aluvial la cual fue originada por procesos fluviales acumulativos de sedimentos en las llanuras de inundación de los ríos activos como el Tonalá, sin embargo en 1675 el río Mezcalapa (Grijalva) cambió de curso hacia la zona entre Villahermosa y Cunduacán, conectándose con el río de La Sierra y desde la década de los 60 no recibe aluviones debido a la construcción de bordos contra inundaciones en la margen izquierda del bordo Samaria.

Las llanuras aluviales están constituidas por materiales acarreados y depositados por corrientes fluviales, están compuestos por una amplia gama de sedimentos entre los que predominan los de granulometría mediana y fina, predominan en climas húmedos y semiáridos (Miralles, 2010). Por el área de estudio pasa un sistema meandriforme el cual fluye sobre una llanura de inundación, los sedimentos de llanuras de inundación pueden almacenar sedimentos antiguos como actuales, donde los ríos transportan material fino como arenas, limos y arcillas (Tarbuck, 2005).

4.1.3 Suelos predominantes

Los suelos que se forman en esta llanura aluvial de acuerdo con el mapa de tipos de suelos son Fluvisoles, Vertisoles y Gleysoles y de acuerdo con Zavala (1993) en la zona ocupada por instalaciones petroleras del campo petrolero Samaria, hay dos tipos de suelos presentes Gleysoles y Fluvisoles. Los suelos de tipo Fluvisoles se caracterizan por ser suelos jóvenes y poseen perfiles con evidencia de



estratificación, los suelos Vertisoles son suelos muy arcillosos (arcillas expandibles), forman grietas cuando se secan desde la superficie hasta el fondo y por último los Gleysoles son suelos inundables y muy permeables, caracterizados por presentar colores rojizos, pardos, amarillentos, grisáceos y azulados (CONAGUA, 2011).

Autores como Zavala (1993) y Gutiérrez y Zavala (2002), expresaron que el tipo de suelo en la zona ocupada por el campo petrolero Samaria son de dos tipos, Fluvisoles y Gleysoles los cuales son descritos de la siguiente manera:

➤ Fluvisoles

Formadas por sedimentos grueso, con depósitos estratificados, y están relacionados con cauces de ríos perennes o inactivos. Se caracterizan por presentar textura media, se ubican en relieves altos, no inundados y presentan un buen drenaje lo que facilita su oxidación y precipitación rápida lo que hace que haya poca concentración de hidrocarburos totales.

➤ Gleysoles

Este tipo de suelo se caracteriza por estar formado por sedimentos de grano fino (arcillas y limos), a diferencia de los Fluvisoles se encuentran inundados en el periodo de lluvias que en el estado abarcan los meses de junio a noviembre, debido a esto presentan propiedades Gleyicas, pueden contener ligeras a altas concentraciones de hidrocarburos totales, presentan un buen drenaje y buena actividad biológica.

4.1.4 Plantaciones y vegetación en el área de estudio

La vegetación original ha sido sustituida alrededor de un 90% debido a las actividades androgénicas como la agricultura y ganadería, lo que ha provocado un empobrecimiento en los suelos. En la zona de estudio se encuentran en su mayoría pastizales cultivables donde predominan sembradíos de plátano, maíz, cacao y cultivos de temporada.



La vegetación presente son formaciones herbáceas características de zonas inundables, como vegetación hidrófila y en una menor proporción vegetación arbórea la cual está representada por acahuales, riparios y tintales. En las cuales podemos encontrar espadaño (*Typha latifolia*), lirio acuático (*Eicchornia crassipes*), popal (*Thalia geniculata*), sombrerito de agua (*Hydrocotitle umbetalla*), cola de pato (*Pontederia sagitata*) y *Echinodorus cordifolius*; y vegetación arbórea como el chelele (*Inga vera*), tinto (*Heamatoxylum campechianum*), jobo (*Spondias mombin*), zapote de agua (*Pachira aquatica*) y puckté (*Bucida humboldtiana*). De igual forma especies vegetales como *Slix humboldtiana*, *Mimosa pigra*, *Ludwigia octavalis*, *Panicum máximun*, *Ipomea indica*, *Spondias mombin* y *Cicus sycioides* (CONAGUA, 2011).

4.1.5 Ecosistemas

Se pueden encontrar una riqueza faunística de aves, mamíferos y reptiles. Las especies de aves que habitan la zona son el pijije (*Dendrocygna bicolor*), Zopilote cabeza rojo (*Cathartes burrovianus*), chombo (*Coragyps atratus*), pea (*Cyanocorax morio*), pijul (*Crotophaga sulcirostris*), dives (*Dives dives*), cezontle (*Icterus gularis*), garza ganadera (*Bubulcus ibis*), garza real (*Ardea alba*), arrocero (*Sporophila torqueola*) y zanate (*Quiscalus mexicanus*). Respecto a mamíferos se han observado zorro (*Didelphis virginiana*), ardilla gris (*Ciurus aureogaster*) y mapache (*Procyon lotor*) (CONAGUA, 2011).

También se encuentran reptiles y anfibios tales como el sapo común (*Bufo valliceps*), rana grillo (*Hyla loquax*), rana de lluvia (*Smillisca baudini*), el toloque (*Basiliscus vittatus*), chuchu (*Hemidactylus frenatus*) e iguana verde (*Iguana iguana*). La ictiofauna que se encuentra en el río Samaria se compone de varias especies como la sardina del Papaloapan (*Doroma anale*), bagre aguadulce (*Cathorops aguagulce*), agujón (*Strongylura hubbsi*), topote del atlántico (*Poecilia mexicana*), topote lacandon (*Poecilia petenesis*), mojarra (*Cichlasoma*), tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapia azul (*Oreochromis aureus*), tenguayaca (*Petenia splendida*) y robalo blanco (*Centropomus undecimalis*) (CONAGUA, 2011).



CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

5.1 Materiales

Los materiales y reactivos que se utilizaron en el muestreo se describen en la tabla 2. El método de muestreo se realizó en zig-zag, en el cual se fue avanzando en forma de “Z” a través del perfil. La toma de muestras fue desde el primer horizonte hasta el manto freático.

Tabla 2. Materiales y reactivos usados para el muestreo de suelos.

MATERIALES		REACTIVOS	
Cava hoyos	Pala jardinera	Lona	Agua
Pala recta y curva	Camara	Bolsas de plástico	H ₂ O ₂
Espátula	Bitacora	Flexómetro	CH ₃ COOH
Bolsas negras	Marcador	Piseta	
Etiquetas	Botiquín de primeros auxilios	Jeringas	
Frascos de vidrio	Guantes de látex y de carnaza	GPS	

5.2 Parámetros físicos y químicos según la NOM-021-SEMARNAT-2000

5.2.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH controla las reacciones químicas y biológicas en el suelo y es una de las mediciones más importantes en el análisis geoquímico. Los reactivos utilizados para determinar el pH son:

- Agua destilada
- Soluciones de pH 4.00, 7.00 y 10.00 para calibrar el conductímetro, deben estar a temperatura ambiente.

El material y equipo para realizar la medición son los siguientes:

- Conductímetro HI 9813-5, electrodo HI-1285 sonda combinada pH/EC/TDS
- Balanza con 0.1 g de sensibilidad
- Frascos de vidrio o plásticos con capacidad de 50 a 100 ml



- Pipeta volumétrica de 20 ml
- Varilla de vidrio

Procedimiento:

- I. Se pesaron 5 g de suelo
- II. Se utilizaron 10 ml de agua destilada
- III. Con la varilla de vidrio se agitó para homogenizar por 5 minutos
- IV. Se calibró el conductímetro con las soluciones pH 4.00, 7.00 y 10.00 y se enjuagó con agua destilada antes de iniciar las lecturas
- V. Se agitó nuevamente y se midió tres veces
- VI. Se midió la temperatura
- VII. Se registró el pH cuando la lectura se estabilizó

Para interpretar los resultados se hizo uso de la tabla 3 para la clasificación de suelos.

Tabla 3. Clasificación del pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

CLASIFICACIÓN	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5



5.2.2 Conductividad Eléctrica (CE)

La CE es uno de los parámetros más sencillos de realizar, debido a que se usa el extracto de saturación obtenido con la medición del pH, en el cual se filtra la muestra para separar sólidos de líquidos con ayuda de un papel filtro de celulosa.

La medición se lleva a cabo utilizando un conductímetro HI 9813-5, electrodo HI-1285 sonda combinada pH/EC/TDS previamente calibrado. Para su interpretación nos basamos en los valores establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de la CE según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clasificación	CE
Efectos despreciables de salinidad	< 1.0
Muy ligeramente salino	1.1 - 2.0
Modernamente salino	2.1 - 4.0
Suelo salino	4.1 - 8.0
Fuertemente salino	8.1 - 16.0
Muy fuertemente salino	> 16

5.2.3 Textura

Para la determinación de textura se utilizó el método del Bouyoucos. Los reactivos utilizados fueron:

- Peróxido para evitar la materia orgánica

Los materiales y equipo:

- Hidrómetro de Bouyoucos con escala de 0-60
- Probeta de 1000 ml
- Cilindro de Bouyoucos
- Agitador (Licuadora)
- Balanza
- Termómetro de -10 a 110 °C



Procedimiento:

- I. Se pesaron 50 g de suelo
- II. Se llenó la probeta de 1000 ml con agua
- III. Se agitó el suelo con agua en la licuadora por 5 minutos
- IV. Se evitó la espuma agregando peróxido
- V. Se midió con el Bouyoucos y el termómetro (primera lectura)
- VI. Se dejó reposar por 2 horas y se tomó la segunda lectura
- VII. Cada muestra se repitió tres veces

La textura se calculó mediante las siguientes formulas y los resultados se interpretaron por medio de un triángulo de textura donde nos presentan las diferentes clases texturales (figura 5) dependiendo del porcentaje presente de %A(arena), %R(arcilla) y %L(limo).

$$(\%L(\text{limo}) + \%R(\text{arcilla})) = L_1 + Fc \times 2$$

Donde:

L_1 : Lectura 1

L_2 : Lectura 2

Fc : En base a la temperatura

$$\%A = 100 - (\%L + \%R)$$

$$\%R = (L_2 + Fc) \times 2$$

$$\%L = 100 - \%A - \%R$$

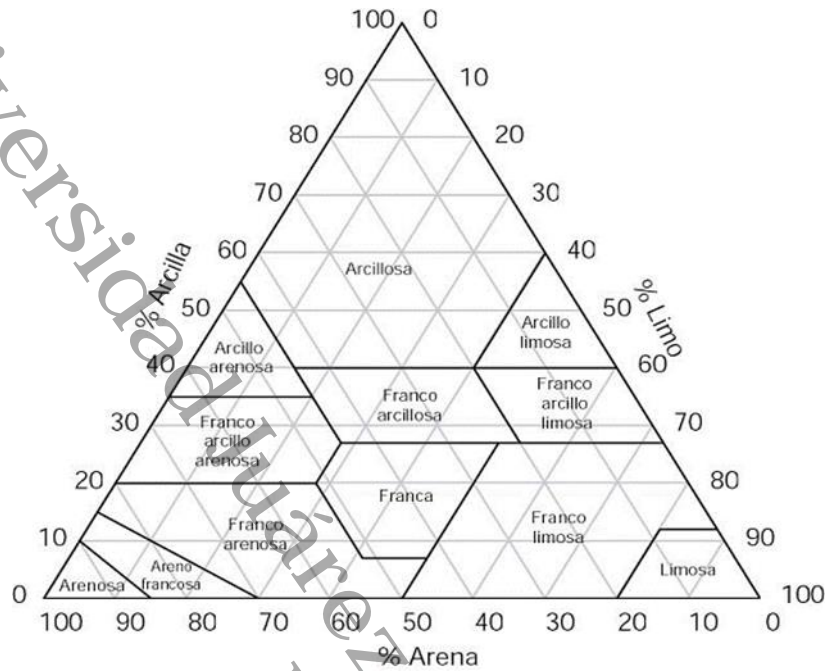


Figura 5. Triángulos de clases texturales (USDA, 2019).

5.2.4 Densidad Real (DR)

Se determinó la densidad real por medio del método del matraz en el cual solo se necesitó dos parámetros, la masa y el volumen de suelo.

Los materiales y equipo:

- Matraz de 25 ml
- Balanza analítica
- Embudo de plástico
- Guantes
- Agua destilada

Procedimiento:

- I. Se pesó el matraz perfectamente limpio y se anotó la medida
- II. Se llenó el matraz con 5 g de suelo y se anotó el peso registrado



- III. Se aforó con agua destilada el matraz con suelo y se agitó para que el suelo absorba el agua
- IV. Se midió el peso del matraz con suelo y agua, se anotó
- V. Se vació el matraz con suelo y agua, posteriormente se lavó
- VI. Se pesó el matraz con agua y anotararlo

Para calcular la densidad real se utilizó la siguiente formula:

$$v_s = \frac{\text{Peso del agua desplazada por partículas de suelo}}{\text{Densidad del agua}}$$

$$v_s = \frac{(ps_4) - (ps_1)}{pw} - \frac{(ps_3) - (ps_2)}{pw}$$

$$\text{Densidad real } (\rho_s) = \frac{ps}{v_s}$$

Donde:

v_s : Volumen de las partículas del suelo

pw : Densidad del agua

ps : Peso de las partículas del suelo

ps_1 : Peso del matraz

ps_2 : Peso del matraz con suelo

ps_3 : Peso del matraz con agua y suelo

ps_4 : Peso del matraz con agua

5.2.5 Densidad Aparente (DA)

Materiales y equipo:

- Tres probetas de 10 ml
- Balanza analítica
- Suelo tamizado



Procedimiento:

- I. Se pesó la probeta vacía y se anotó
- II. Se agregó el suelo hasta aforarlo
- III. Se dieron tres golpes
- IV. Se volvió a aforar
- V. Se anotó el peso

Cabe destacar que se hizo por triplicado.

5.2.6 Materia orgánica (MO)

Materiales:

- Vasos de vidrio
- Peróxido (2 ml)
- Ácido nítrico (1 ml)
- Suelo tamizado (2 g)

Procedimiento:

- I. Se pesaron los vasos y se les añadió 2 g de suelo (se anotó el peso)
- II. Se añadieron 2 ml de peróxido y se anotó si la reactividad fue baja, media o alta
- III. Se esperó hasta que dejó de haber reactividad con peróxido
- IV. Posteriormente se agregó 1 ml de ácido nítrico y de igual forma se anotó si la reacción fue baja, media o alta
- V. Se dejaron reposar por 24 horas
- VI. Se metieron a la estufa por 72 horas
- VII. Se pesaron nuevamente después de sacarlas de la estufa



5.2.7 Capacidad de Campo (CC)

Materiales:

- Vasos de unicel
- 10 ml de agua
- Suelo tamizado (5 g)
- Papel de celulosa

Procedimiento:

- I. Se hicieron perforaciones en la parte debajo de los vasos
- II. Se cortó papel de celulosa en forma circular y del tamaño de la base del vaso
- III. Se colocó el círculo de papel de celulosa en el vaso y se anotó el **peso del vaso vacío**
- IV. Se agregó 5 g de suelo y se pesó (el **peso del vaso /suelo**)
- V. Se vertió 10 ml de agua
- VI. Se dejó reposar 30 minutos en una charola con agua
- VII. Después se pesó y se anotó el **peso húmedo**
- VIII. Se dejó reposar por 2 horas
- IX. Se guardaron en la estufa por una semana
- X. Se pesó y anotó el **peso seco**

Es importante mencionar que cada muestra se hizo por triplicado.



5.2.8 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Los resultados fueron comparados con los establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (tabla 5). Para llevar a cabo este parámetro químico se siguió el siguiente procedimiento:

- I. Se preparó una solución a 1 M de acetato de sodio (grado reactivo)
- II. Se pesaron 5 g de suelo
- III. Se colocaron las muestras de suelo en vasos de precipitado
- IV. Se disolvieron con 10 ml de agua destilada
- V. Se hicieron tres lavados agregando 10 ml de la solución de acetato de sodio
- VI. Se filtró, resguardó y pesó, lo que fue el **V1**.
- VII. Se midió el pH y CE. (Si el extracto obtenido da un pH básico se le agrega H₂SO₄ hasta lograr un pH neutro. En caso contrario se le agrega (pH ácido) NaOH para conseguir la neutralidad).
- VIII. En caso de agregarse lo mencionado anteriormente (H₂SO₄ y NaOH), se mide el volumen agregado (**VG**).

Para calcular la CIC se aplicó la siguiente fórmula:

$$C1 C2 = C2 V2$$

Donde:

$$V2 = V1 + VG$$

Tabla 5. Clasificación de la CIC según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Grupos	CIC (Cmol (+) · kg ⁻¹)
Caolinitas	3 - 15
Esmécticas	80 - 150
Micas hidratadas	10 - 40
Vermiculitas	100 - 150
Cloritas	10 - 40



5.2.9 Porosidad (%Po)

La porosidad es uno de los parámetros más fáciles en realizar, ya que solo se necesitan conocer los valores de la DR y DA, para obtener su valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Po = \frac{DR - DA}{DR} \times 100$$

5.3 Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) por método Soxhlet

En el capítulo 2 se explicó el proceso de la extracción continua con el método Soxhlet. Para la determinación de HTP en la matriz del suelo se optó por utilizar el método EPA 9071B para la extracción de HTP, propuesto por la [NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012](#); cabe destacar que la norma menciona que se debe utilizar el solvente hexano, el cual si lo realizamos, pero de igual manera nos basamos en las indicaciones propuestas por [Martínez-Chávez et al., \(2017\)](#), en el que mencionan que al usar diclorometano existe un mayor rendimiento en la extracción del analito presente en suelos contaminados. El procedimiento fue el siguiente:

- I. Se pesaron 5 g de suelo
- II. Se hicieron cartuchos de celulosa tamaño 10 cm x 10 cm
- III. Se agregaron el suelo en el cartucho de celulosa
- IV. Se colocaron los cartuchos en la cámara del dedal del equipo Soxhlet
- V. Se añadieron 150 ml del solvente (hexano o diclorometano) en el matraz bola
- VI. La extracción tuvo una duración de 8 horas



5.4 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El extracto obtenido por la extracción continua (Soxhlet) fue resguardado para el análisis de los grupos funcionales asociados a los hidrocarburos. Se realizó en el equipo FTIR modelo Nicolet iDt ATR marca Thermo Scientific con S/N: ASC 1816087 y con número de inventario MI-0606001940002-09.

5.5 Difracción de Rayos X (DRX)

En el capítulo 2 se explicó el fundamento de la técnica, por lo que en este apartado nos centramos en la metodología para su realización. Se utilizó un difractómetro para polvos marca 2D PHASER, con las condiciones respectivas con la que se realizaron los análisis se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros y condiciones del equipo de DRX.

Parámetros	Condiciones
Angulo de incidencia	2 θ
Rango de medida	10° - 80°
Tamaño del paso	0.02°
Tiempo de integración	0.2 segundos

Procedimiento:

- I. Se limpiaron los porta muestras con acetona
- II. Se agregó el suelo, asegurándose que cubra todo el porta muestras
- III. Se colocó sobre el sujetador circular que se encuentra dentro del difractómetro



5.6 Espectrofotometría de Absorción Atómica por Flama

Para la determinación de los metales pesados presentes en los suelos, se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Varían AA240FS para su lectura, el cual proporciona la absorbancia de cada metal y la concentración de los metales presentes. La realización y el manejo de las muestras fueron hechos siguiendo las recomendaciones de la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004. El procedimiento para la digestión acida es el siguiente:

- I. Se pesaron 0.3 g de suelo en vasos de precipitado
- II. Se colocaron en parrillas de 100°- 150° C
- III. Añadieron 1 ml de HNO₃
- IV. Una vez evaporado se añadió 1 ml de H₂O₂ (para quitar MO)
- V. Agregaron 3 ml de HCl 1:1 (para recuperar la muestra)
- VI. Se filtró
- VII. Por último, se llevó a un volumen de 50 ml con agua desionizada



CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Clasificación del suelo

Como lo mencionado en el capítulo 4, los suelos predominantes en la zona de estudio son Gleysoles y Fluvisoles, podemos observar la tabla 7 donde se presenta el tipo de suelo de cada punto, en el cual observamos que contamos con tres tipos diferentes de suelo en la zona de estudio, siendo el Gleysol Vertico el dominante con 18 puntos, siguiendo el Fluvisol Gleyco con tres y, por último, el Gleysol Eutrico con dos puntos de muestreo.

Tabla 7. Tipo de suelo de cada punto.

ID	Tipo de suelo	ID	Tipo de suelo
P1	GLEYSOL VERTICO	P13	GLEYSOL VERTICO
P2	GLEYSOL VERTICO	P14	GLEYSOL VERTICO
P3	GLEYSOL VERTICO	P15	GLEYSOL EUTRICO
P4	GLEYSOL VERTICO	P16	GLEYSOL EUTRICO
P5	GLEYSOL VERTICO	P17	GLEYSOL VERTICO
P6	GLEYSOL VERTICO	P18	GLEYSOL VERTICO
P7	GLEYSOL VERTICO	P19	GLEYSOL VERTICO
P8	GLEYSOL VERTICO	P20	GLEYSOL VERTICO
P9	GLEYSOL VERTICO	P21	GLEYSOL VERTICO
P10	FLUVISOL GLEYICO	P22	GLEYSOL VERTICO
P11	FLUVISOL GLEYICO	P23	GLEYSOL VERTICO
P12	FLUVISOL GLEYICO		

En el siguiente mapa (figura 6) se muestra las distribuciones de los tipos de suelo para la zona de estudio.

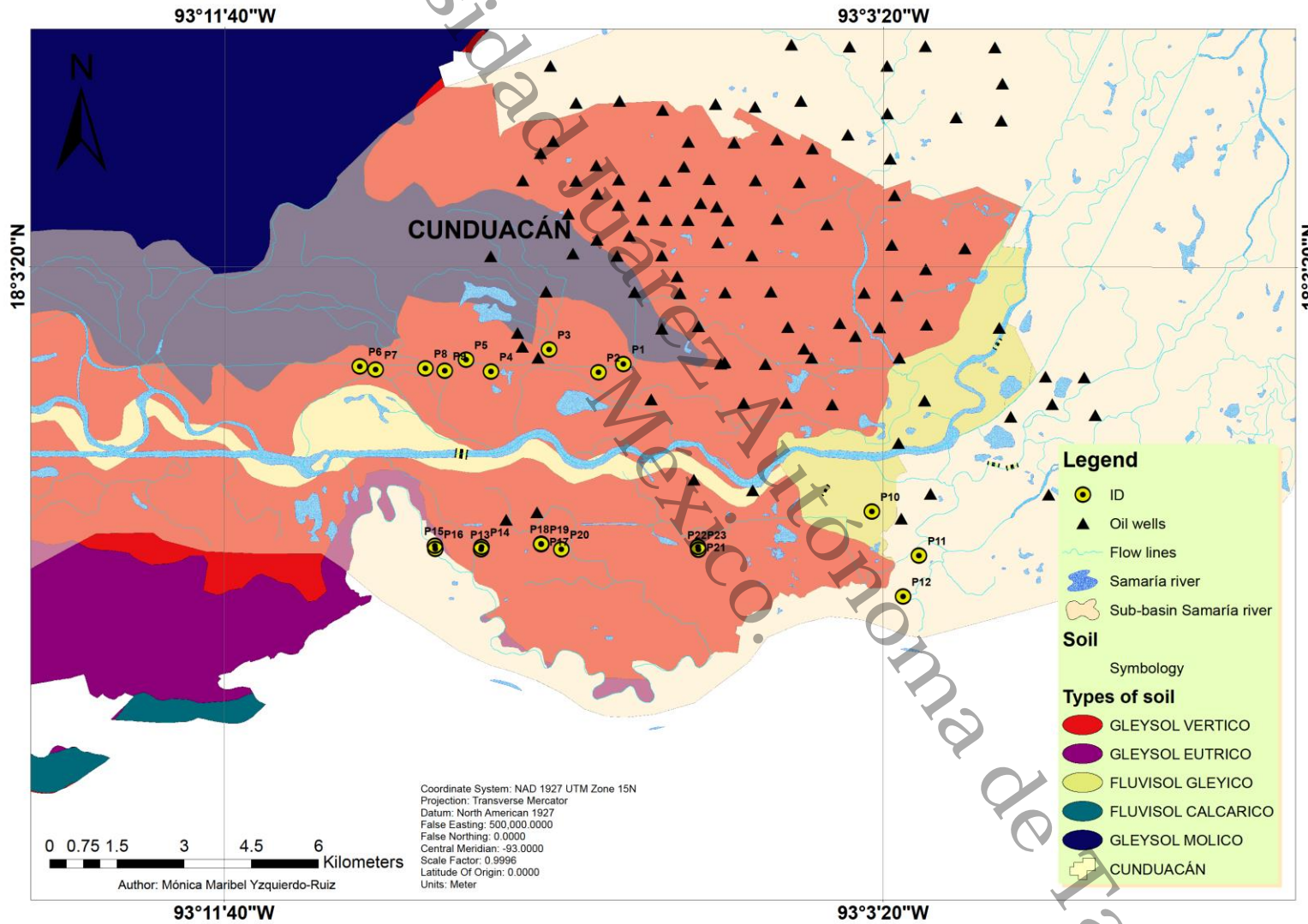


Figura 6. Mapa de ubicación por tipo de suelo.



En este apartado se exponen la descripción de cinco puntos de muestreo (ver tabla 8), debido a que fueron elegidos teniendo en cuenta los tres tipos de suelo que se encuentran en la zona, de igual forma, es importante mencionar que esta diferencia de tipos de suelos, se decidió solo hacer petrografía y DRX para estas cinco muestras y poder discutir las en los siguientes apartados. Cabe destacar que la descripción de los puntos restantes se pondrá en Anexos.

A continuación, se presenta (tabla 9, 10, 11, 12 y 13) la clasificación del tipo de suelo y textura de los cinco puntos seleccionados.

Tabla 8. Clasificación del tipo de suelo y textura de cinco muestras de suelo.

ID	Tipo de suelo	Textura
P1	GLEYSOL VERTICO	LIMOSA
P4	GLEYSOL VERTICO	FRANCO ARENOSA
P7	GLEYSOL VERTICO	FRANCO LIMOSA
P10	FLUVISOL GLEYICO	FRANCO ARENOSA
P15	GLEYSOL EUTRICO	FRANCO LIMOSA

Tabla 9. Descripción del P1.

PUNTO 1	
Coordenadas UTM Zona 15 Q	
ESTE (m E)	NORTE (m N)
0488318	1994047
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 2; padding-left: 10px;"> <p>Descripción Se observaron dos horizontes en el perfil edafológico.</p> <p>Horizonte 1</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundidad de 25 cm ▪ Material parental arcilla ▪ Color pardo oscuro 2.5Y 3/2 ▪ Moteas pardas claras ▪ Reactividad con peróxido alta ▪ Reactividad con acetato baja <p>Horizonte 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundidad de 25 cm ▪ Material parental arcilla ▪ Color pardo claro 2.5Y 5/3 ▪ Moteas pardas claras ▪ Reactividad con peróxido alta ▪ Reactividad con acetato alta <p>Se observó pastizales como se muestran en las figuras, el lugar donde se extrajo el perfil edafológico fue en un rancho ubicado en la ranchería Los Cerros en el municipio de Cunduacán, Tabasco, la principal actividad es la cría de ganado brama.</p> </div> </div>	
<p><i>Figura 7. Muestra P1.</i></p>	

Tabla 10. Descripción del P4.

	Punto 4	
	Coordenadas UTM Zona 15 Q	
	ESTE (m E)	NORTE (m N)
	0485364	1993882
	Horizonte 1	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundidad 16 cm ▪ Color pardo claro 2.5Y 5/4 ▪ Reacción con peróxido media ▪ Reacción con acetato baja ▪ Presencia de moteas anaranjadas ▪ Presencia de silicatos ▪ Gleysiación ▪ Materia orgánica en descomposición 	
	Horizonte 2	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundidad de 34 cm ▪ Material parental arcilloso ▪ Color pardo oscuro 2.5Y 4/4 ▪ Reacción con peróxido alta ▪ Reacción con acetato alta ▪ Presencia de moteas claras ▪ Presencia de carbono mineral ▪ Presencia de magnesio oxidado ▪ Gleysiación 	
	En esta zona se encontró presencia de pasto chontalpo siperus.	

Figura 8. Muestra P4.



Tabla 11. Descripción del P7.

	Punto 7 Coordenadas UTM Zona 15 Q	
	ESTE (m E)	NORTE (m N)
	0482790	1993920
	Descripción Horizonte 1	
	<ul style="list-style-type: none">▪ Material parental limo-arcilloso▪ Color pardo oscuro 2.5Y 3/3▪ Reacción con peróxido alta▪ Reacción con acetato baja▪ Presencia de moteas color naranja▪ Presencia de silicatos <p>En este punto había sembrados de platano.</p>	

Figura 9. Muestra P7.

Tabla 12. Descripción del P10.

Punto 10
Coordenadas UTM Zona 15 Q

ESTE (m E)	NORTE (m N)
0493867	1990737

Horizonte 1

- Material parental limo-arcilloso
- Color pardo 2.5Y 3/3
- Reacción con peróxido alta
- Reacción con acetato alta
- Presencia de moteas color naranja
- Presencia de materia orgánica
- Actividad biológica
- Presencia de carbono mineral

Horizonte 2

- Material parental limo-arcilloso
- Color pardo
- Reacción con peróxido alta
- Reacción con acetato media
- Presencia de moteas color naranja

Este tipo de suelo puede ser Antrosol, se observó que está relleno de grava, hay presencia de zarza lo cual puede indicar salinidad y se pueden observar relieves gilgay.



Figura 10. Muestra del P10.



Tabla 13. Descripción del P15.

Punto 15	
Coordenadas UTM Zona 15 Q	
ESTE (m E)	NORTE (m N)
0484108	1989970
Horizonte 1	
<ul style="list-style-type: none">Material parental arcillosoColor pardo 2.5Y 4/4Presencia de moteas color naranjaPoca presencia de materia orgánica	
Se observó vegetación del tipo zacate, plátano y mulato.	



Figura 11. Muestra del P11.



6.2 Parámetros físicos y químicos

Tabla 14. Resultados de todos los parámetros físicos y químicos.

ID	pH	±	DR	±	DA	±	CE	±	Po	CC	±	MO	CIC	%A (Arena)	±	%R (Arcilla)	±	%L (Limo)	±
P1	7.733	0.057	2.434	0.106	0.968	0.010	0.070	0.010	60.230	56.318	0.684	1.770	63.490	10.100	0.000	5.400	0.000	84.500	0.000
P2	7.966	0.057	2.519	0.101	1.028	0.011	0.093	0.005	59.190	54.642	0.640	1.929	45.980	50.741	1.414	5.400	0.000	43.859	1.414
P3	7.633	0.057	2.404	0.122	1.017	0.168	0.063	0.005	57.696	43.413	0.596	1.854	48.000	38.177	1.414	4.300	0.000	57.523	1.414
P4	7.766	0.057	2.252	0.242	1.132	0.127	0.073	0.005	49.734	49.726	0.988	1.762	53.896	59.536	0.000	3.960	0.000	36.504	0.000
P5	7.966	0.057	2.547	0.141	1.038	0.011	0.173	0.011	59.246	37.878	1.565	3.895	44.000	41.279	1.414	4.680	0.000	54.041	1.414
P6	8.000	0.000	2.320	0.076	0.958	0.166	0.310	0.010	58.706	47.251	0.588	2.009	48.000	26.382	1.414	9.157	0.000	64.461	1.414
P7	7.533	0.057	2.208	0.255	0.916	0.020	0.073	0.005	58.514	47.158	0.998	1.838	56.834	16.318	0.707	4.680	0.000	79.002	0.707
P8	7.233	0.057	2.538	0.057	1.431	0.013	0.073	0.005	43.617	35.830	1.228	2.303	50.000	88.741	1.414	5.400	0.000	5.859	1.414
P9	6.866	0.057	2.275	0.44	0.945	0.027	0.046	0.005	58.462	49.362	1.171	2.966	43.940	29.741	0.000	6.823	0.000	63.436	0.000
P10	7.300	0.000	2.356	0.077	1.107	0.017	0.196	0.005	53.014	42.027	1.361	2.171	47.397	47.100	1.414	5.400	0.000	47.500	1.414
P11	7.233	0.057	2.42	0.096	0.824	0.019	0.076	0.004	65.950	46.990	0.529	2.406	43.980	27.459	1.414	3.240	0.000	69.301	1.414
P12	7.066	0.057	2.31	0.167	1.399	0.006	0.163	0.005	39.437	35.626	0.687	3.044	48.980	96.818	0.000	3.182	0.000	0.000	0.000
P13	5.933	0.057	2.259	0.111	0.948	0.011	2.297	0.006	58.035	49.783	0.918	0.109	45.000	34.600	0.000	5.400	0.000	60.000	0.000
P14	5.233	0.057	2.472	0.13	1.217	0.014	0.376	0.005	50.769	44.433	0.590	0.044	44.000	43.177	0.000	5.040	0.000	51.783	0.000
P15	6.000	0.000	1.726	0.029	0.867	0.008	1.873	0.005	49.768	57.163	0.438	0.101	57.703	34.022	1.414	7.182	0.000	58.796	1.414
P16	4.833	0.057	1.676	0.062	0.837	0.015	2.346	0.005	50.060	55.337	0.247	0.193	36.720	43.459	1.414	7.541	0.000	49.000	1.414
P17	7.166	0.057	2.545	0.061	1.216	0.033	0.596	0.005	52.220	44.612	1.751	0.036	46.000	50.880	1.414	6.120	0.000	43.000	1.414
P18	7.266	0.057	2.362	0.093	1.195	0.037	0.543	0.005	49.407	43.153	0.548	0.022	47.000	52.880	1.414	6.120	0.000	41.000	1.414
P19	7.066	0.057	2.342	0.023	1.208	0.058	0.596	0.005	48.420	46.035	0.929	0.033	47.000	50.880	1.414	6.120	0.000	43.000	1.414
P20	7.066	0.057	2.598	0.02	1.468	0.032	1.296	0.005	43.495	33.457	1.811	0.018	50.960	92.600	0.000	5.400	0.000	2.000	0.000
P21	6.533	0.057	2.531	0.062	1.222	0.025	0.630	0.000	51.719	33.345	0.423	0.026	49.000	60.818	0.000	5.040	0.000	34.142	0.000
P22	6.700	0.000	2.369	0.079	1.018	0.019	0.543	0.005	57.028	51.490	1.964	0.080	45.000	8.459	0.000	5.400	0.000	86.141	0.000
P23	5.300	0.000	2.51	0.256	0.977	0.034	1.343	0.004	61.076	46.763	1.636	0.055	43.880	24.284	0.000	6.120	0.000	69.596	0.000



En la tabla 14 se muestran siete parámetros físicos, los cuales son DR, DA, CE, %Po, CC, MO y textura; y dos parámetros químicos, pH y CIC. Estos nueve parámetros físicos y químicos están establecidos por la norma mexicana anteriormente mencionada, cada uno de ellos tienen a su lado derecho la desviación estándar simbolizada por “±”. Es importante mencionar que el %Po, MO y CIC fueron los únicos que no se realizaron por triplicado.

6.2.1 Textura

La textura es el parámetro físico más importante, para realizarlo utilizamos la técnica mencionada en la NOM-021-SEMARNAT-2000 ([Diario Oficial de la Federación, 2002](#)), en la cual los materiales son un densímetro Bouyoucos y el termómetro, se necesitan 50 g de suelo, previamente tamizado en un tamizador de 2 mm para evitar tener partículas del tamaño de gravas, fue secado a temperatura ambiente y cada medición se hizo por triplicado siguiendo la metodología expuesta por la norma mexicana, los resultados fueron calculados por la fórmula e interpretados siguiendo el triángulo de textura (figura 12).

$$(%L(\text{limo}) + \%R(\text{arcilla})) = L_1 + Fc \times 2$$

Donde:

L_1 : Lectura 1, L_2 : Lectura 2, Fc : En base a la temperatura

$$\%A = 100 - (\%L + \%R)$$

$$\%R = (L_2 + Fc) \times 2$$

$$\%L = 100 - \%A - \%R$$

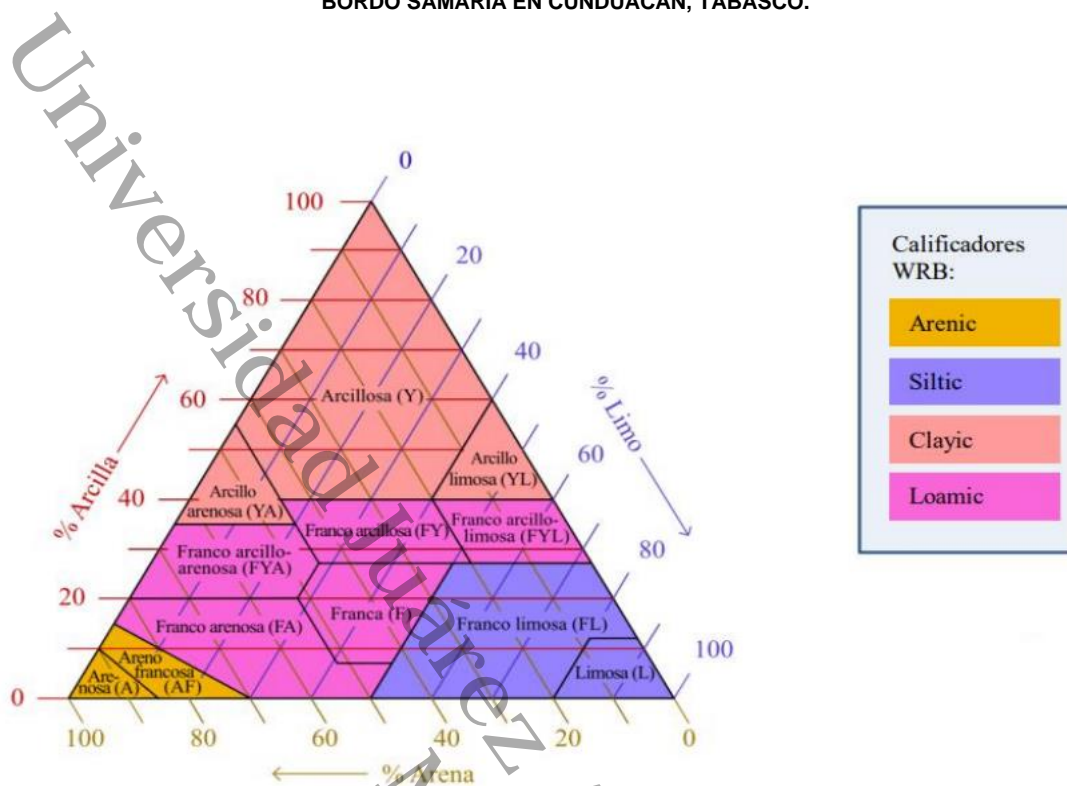


Figura 12. Clases texturales y clasificadores según la WRB (2015), Bunes et al. (2020).

En términos generales, la textura se refiere a la distribución de los tamaños de partículas que constituyen los suelos, los cuales son la fracción arena (2 mm – 0.05 mm), limo (0.05 mm – 0.002 mm) y arcilla (<0.002), la presencia de diferentes tamaños de partículas minerales hace que hayan diferentes tipos de textura, y de acuerdo a la clasificación hecha por la [WRB \(2015\)](#) tenemos a los clasificadores secundarios (figura 12): Arenic (clase textural arenosa), Siltic (clase textual limosa a franca limosa), Clayic (clase textural arcillosa) y Loamic (clase textural franca).

Cabe destacar que, de nuestras 23 muestras, contamos con solo tres clasificadores secundarios (Arenic, Loamic y Siltic) y 4 clases texturales como se observa en la tabla 15, los cuales se encuentran dentro de suelos Gleysoles y Fluvisoles (figura 13). Observamos en el mapa (figura 13) que la mayoría de nuestros puntos se encuentran dentro del tipo de suelo Gleysol Vertico, cuya descripción textural se encuentra como fina según los datos del inegi, los puntos 15 y 16 son Gleysol



Eutríco con una textura gruesa, los puntos 10, 11 y 12 son Fluvisol Gleyico con una textura media.

En el mapa de la figura 13 podemos notar que la mayoría de nuestras muestras están dentro del tipo de suelo Gleysol Vertico, el cual se caracteriza por tener una textura fina (según los datos del INEGI) pero podemos observar que dentro de esa zona encontramos una variedad de texturas que van desde media a alta (limosa, franco arenosa, franco limosa y arenosa), en lo que podemos inferir que hay un cambio drástico debido a las actividades antropogénicas como la ganadería y agricultura que se suscitan en esta zona.

Tabla 15. Clases texturales presentes en las 23 muestras de suelo.

TEXTURA	ID	%A	±	%R	±	%L	±	C WRB
Limosa	P1	10.100	0.000	5.400	0.000	84.500	0.000	Siltic
Limosa	P22	8.459	0.000	5.400	0.000	86.141	0.000	Siltic
Franco limosa	P3	38.177	1.414	4.300	0.000	57.523	1.414	Siltic
Franco limosa	P5	41.279	1.414	4.680	0.000	54.041	1.414	Siltic
Franco limosa	P6	26.382	1.414	9.157	0.000	64.461	1.414	Siltic
Franco limosa	P7	16.318	0.707	4.680	0.000	79.002	0.707	Siltic
Franco limosa	P9	29.741	0.000	6.823	0.000	63.436	0.000	Siltic
Franco limosa	P11	27.459	1.414	3.240	0.000	69.301	1.414	Siltic
Franco limosa	P13	34.600	0.000	5.400	0.000	60.000	0.000	Siltic
Franco limosa	P14	43.177	0.000	5.040	0.000	51.783	0.000	Siltic
Franco limosa	P15	34.022	1.414	7.182	0.000	58.796	1.414	Siltic
Franco limosa	P23	24.284	0.000	6.120	0.000	69.596	0.000	Siltic
Franco arenosa	P2	50.741	1.414	5.400	0.000	43.859	1.414	Loamic
Franco arenosa	P4	59.536	0.000	3.960	0.000	36.504	0.000	Loamic
Franco arenosa	P10	47.100	1.414	5.400	0.000	47.500	1.414	Loamic
Franco arenosa	P16	43.459	1.414	7.541	0.000	49.000	1.414	Loamic
Franco arenosa	P17	50.880	1.414	6.120	0.000	43.000	1.414	Loamic
Franco arenosa	P18	52.880	1.414	6.120	0.000	41.000	1.414	Loamic
Franco arenosa	P19	50.880	1.414	6.120	0.000	43.000	1.414	Loamic
Franco arenosa	P21	60.818	0.000	5.040	0.000	34.142	0.000	Loamic
Arenosa	P8	88.741	1.414	5.400	0.000	5.859	1.414	Arenic
Arenosa	P12	96.818	0.000	3.182	0.000	0.000	0.000	Arenic



Arenosa	P20	92.600	0.000	5.400	0.000	2.000	0.000	Arenic
----------------	-----	--------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

De igual forma, es importante mencionar los cambios que un contaminante puede hacer con respecto a este parámetro, debido que observamos en la tabla 23 y el mapa de la figura 17 podemos notar que la mayoría de nuestros puntos están contaminados con hidrocarburo, en las cuatro texturas existentes tenemos muestras contaminada.

Álvarez-Jiménez et al., (2019) y Martínez et al., (2001) mencionan que la concentración de arenas aumentan en un suelo contaminado con hidrocarburos y que la concentración de arcilla disminuye, de esta manera si observamos la tabla 15 podemos notar que la concentración de %R (arcilla) está en todas las muestras a < 10.0%, de esta forma, el P12 presenta la concentración %A (arena) más alta 96.818%, la cual se debe a un derrame reciente, como se observa en el mapa (figura 13), en el cual está clasificado como un tipo de suelo Fluvisol Gleiyco con textura media (es importante mencionar que ya no es perteneciente al municipio de Cunduacán pero según los datos del INEGI sigue perteneciendo al mismo tipo de suelo) podemos observar que ahora su textura es arenosa (alta).

A este tipo de suelo le corresponde una textura de fracción media (en su forma natural), esta muestra es un ejemplo del cambio de textura, la cual ahora es arenoso. En caso contrario tenemos el P10, el cual presenta una textura franco-arenosa, la cual, si corresponde con la textura estándar del *Fluvisol*, es un suelo intemperizado que a simple vista no se podría saber si está contaminado y por las referencias la textura en este caso no sería un indicador.

Este parámetro juega un papel importante en el mantenimiento de las condiciones ambientales del suelo, precisamente en la contaminación debido a que la retención de los diferentes tipos de hidrocarburos y metales dependen de la textura (Plante et al., 2006; Semenov et al., 2020; Lăcătușu et al., 2021).

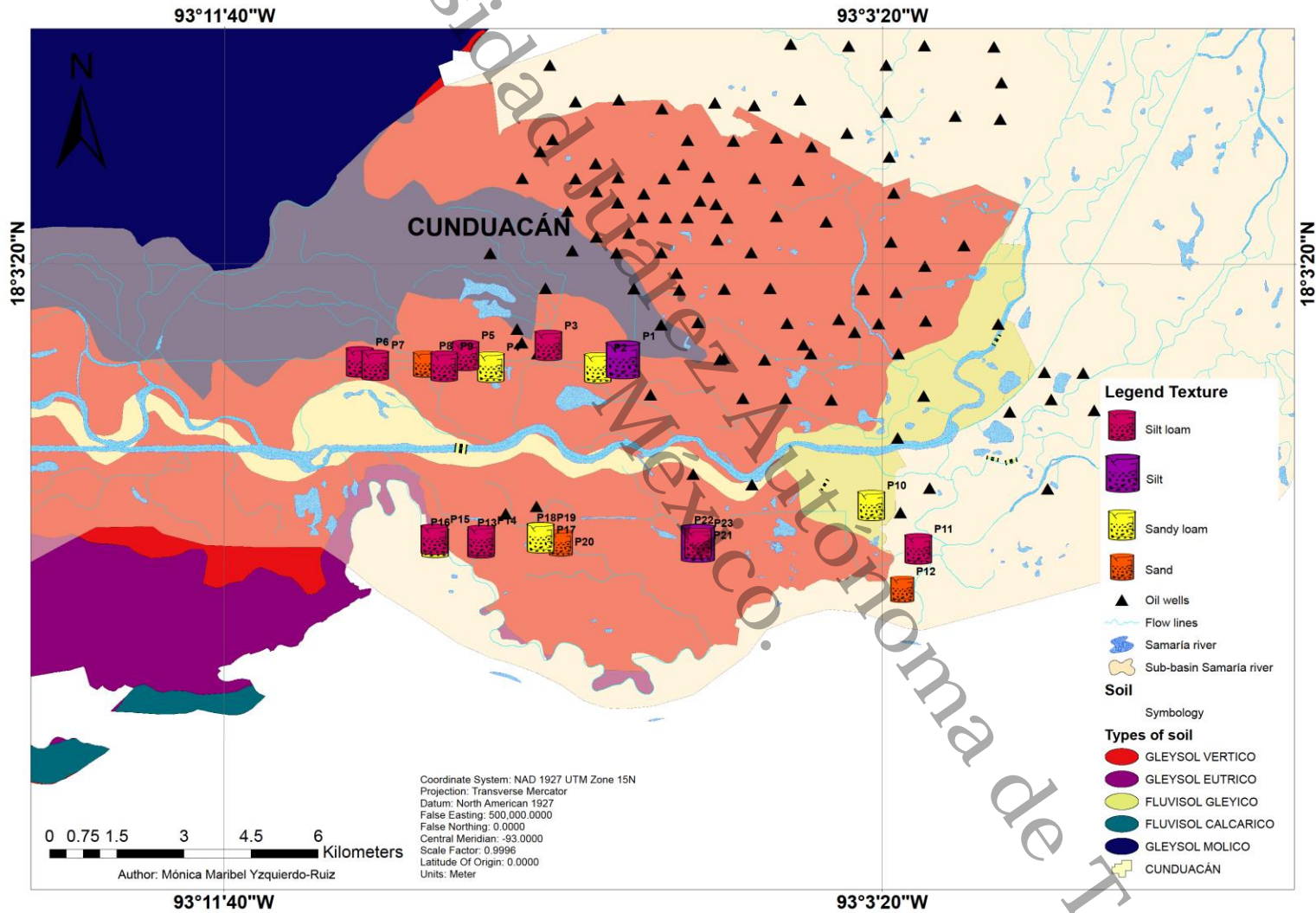


Figura 13. Mapa de distribución textural y tipo de suelo.



6.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si está ácido, neutro o alcalino, por lo que podemos decir que el pH indica el grado de acidez de un suelo. Para su interpretación, nos basamos en la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 ([Diario Oficial de la Federación, 2002](#)), la cual nos da los valores de referencia y comparamos los resultados de las muestras analizadas en esta última, observamos que existe diferentes condicionantes asociadas en grupos (tabla 16).

Tabla 16. Clasificación de cada muestra de suelo del pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

CLASIFICACION	pH	ID MUESTRAS
Fuertemente ácido	< 5.0	P16
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5	P13, P14, P15, P23
Neutro	6.6 – 7.3	P8, P9, P10, P11, P12, P17, P18, P19, P20, P22
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7
Fuertemente alcalino	> 8.5	

Al analizar los resultados (tabla 17) de la prueba Anova para pH encontramos que $p < 0.05$, lo que indica que al menos una prueba es diferente a las demás, para el caso del pH observamos con los resultados obtenidos de la prueba Tukey que las muestras P1, P3 y P4; P2, P5 y P6; P3, P4 y P7; P5 y P6; P8, P10, P17 y P18; P10 y P17; P11, P17 y P18; P12, P17, P19 y P20; P13, P15 y P21;

P14 y P23; P17, P18, P19 y P20; P19 y P20, no hay diferencias significativas con $HSD < 0.160$.

Tabla 17. Resultados de pH de cada punto con su desviación estándar.

ID	pH	ID	pH	ID	pH	ID	pH
P1	7.733 ± 0.057	P7	7.533 ± 0.057	P13	5.933 ± 0.057	P19	7.066 ± 0.057



P2	7.966 ± 0.057	P8	7.233 ± 0.057	P14	5.233 ± 0.057	P20	7.066 ± 0.057
P3	7.633 ± 0.057	P9	6.866 ± 0.057	P15	6.000 ± 0.000	P21	6.533 ± 0.000
P4	7.766 ± 0.057	P10	7.300 ± 0.000	P16	4.833 ± 0.057	P22	6.700 ± 0.000
P5	7.966 ± 0.057	P11	7.233 ± 0.057	P17	7.166 ± 0.057	P23	5.300 ± 0.000
P6	8.000 ± 0.000	P12	7.066 ± 0.057	P18	7.266 ± 0.057		

Álvarez-Jiménez et al., (2019) en su estudio observaron que sus muestras de suelo presentan variaciones en el pH con la presencia de hidrocarburos, en su comparativa con suelo del municipio de Cárdenas, Tabasco, observaron que el suelo testigo presenta un pH moderadamente ácido y el contaminado un pH neutro, por otra parte, Beltrán y Vela (2009) concuerda con que en los suelos contaminados las fracciones de petróleo son medias y suelen presentar un pH neutro, de las 10 muestras que tenemos clasificadas con pH neutro (ver tabla 16 y figura 14), 9 de ellas están contaminadas, teniendo solo 15 suelos contaminados, la mayoría están en esta clasificación, en lo que podemos notar el fuerte impacto antropogénico en un mismo tipo de suelo, en el que esperaríamos encontrar un mismo tipo de pH para cada tipo de suelo presente en la zona de estudio (Gleysol Vertico, Gleysol Eutrico y Fluvisol Gleyico), por ejemplo, en el caso del Gleysol Vertico tenemos pH alcalinos, neutros y ácidos.

Lo dicho anteriormente puede causar confusión debido a que, en términos agropecuarios, los valores intermedios de pH se consideran los más adecuados, ya que los nutrientes para el suelo están más disponibles (INTAGRI, 2018; FAO, 2019), lo que podría causar una errónea interpretación si se está evaluando solo con fines agropecuarios, ya que la mayoría de nuestros suelos con hidrocarburo presentan un pH neutro (tabla 16), afirmando lo dicho por Álvarez-Jiménez et al., (2019) y Beltrán y Vela (2009) en los efectos ocasionados por la presencia de hidrocarburos en suelos en este parámetro químico. Por otro lado, conocer los valores de pH en los suelos es determinante para la retención de metales, para pH ácidos es más probables que se liberen Cd, Ni y Cu (Zhang et al., 2018), teniendo en esta clasificación a los P13, P14, P15 y P23, cabe destacar que Alloway (2013) menciona



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



que los metales en pH bajos son móviles y en pH alcalinos forman carbonatos y fosfatos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

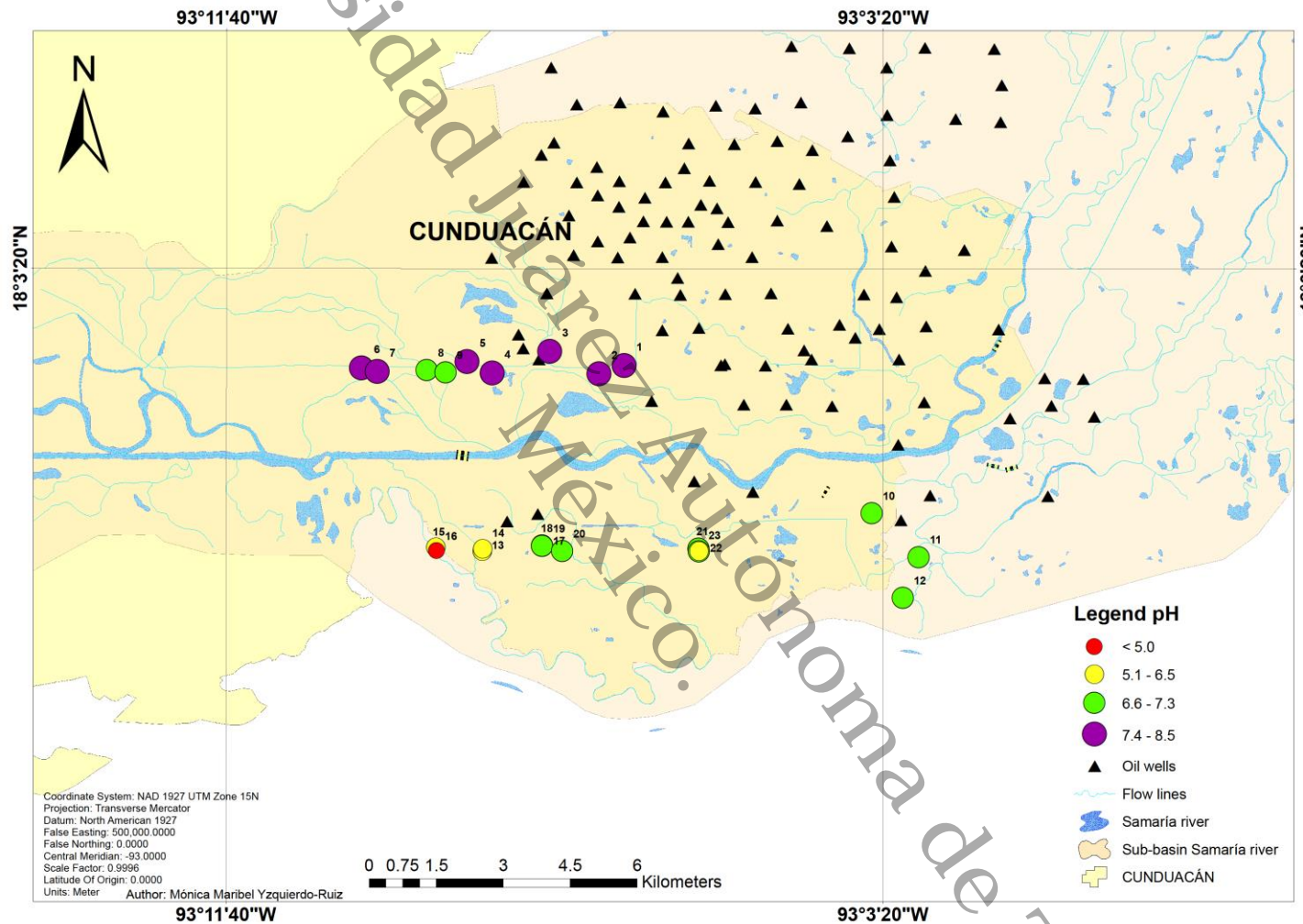


Figura 14. Mapa de distribución de pH.



6.2.3 Conductividad Eléctrica (CE)

La Conductividad Eléctrica (CE) es el grado de la salinidad de un suelo o agua, y esto se refiere a la cantidad de sales presentes en solución. Para su interpretación, nos basamos en la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 ([Diario Oficial de la Federación, 2002](#)), la cual nos da los valores de referencia y comparamos los resultados de las muestras analizadas en esta última, observamos que existe diferentes condicionantes asociadas en grupos (tabla 18).

Tabla 18. Clasificación de las muestras con su respectiva CE según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

EFFECTOS	CE dS m ⁻¹ a 25 °C	ID MUESTRAS
Efectos despreciables de la salinidad	< 1.0	Todos los demás restantes
Muy ligeramente salino	1.1 - 2.0	P15, P20, P23
Moderadamente salino	2.1 - 4.0	P13, P16
Suelo salino	4.1 - 8.0	
Fuertemente salino	8.1 - 16.0	
Muy fuertemente salino	> 16.0	

Al analizar los resultados (tabla 19) de la prueba Anova para CE encontramos que $p < 0.05$, lo que indica que al menos una prueba es diferente a las demás, siendo el $HSD < 0.020$ y las muestras que no tienen diferencias significativas entre ella son P1, P3, P4, P7, P8 y P11; P2, P4, P7, P8 y P11; P3, P4, P7, P8, P9 y P11; P4, P7, P8 y P11; P7, P8 y P11; P8 y P11; P9 y P11; P17 y P19; y por último P18 y P22.

Tabla 19. Resultados de las 23 muestras analizadas para CE con su desviación estándar.

ID	CE	ID	CE	ID	CE	ID	CE
P1	0.070 ± 0.010	P7	0.073 ± 0.005	P13	2.297 ± 0.006	P19	0.596 ± 0.005
P2	0.093 ± 0.005	P8	0.073 ± 0.005	P14	0.376 ± 0.005	P20	1.296 ± 0.005
P3	0.063 ± 0.005	P9	0.046 ± 0.005	P15	1.873 ± 0.005	P21	0.630 ± 0.000
P4	0.073 ± 0.005	P10	0.196 ± 0.005	P16	2.346 ± 0.005	P22	0.543 ± 0.005
P5	0.173 ± 0.011	P11	0.076 ± 0.004	P17	0.596 ± 0.005	P23	1.343 ± 0.004
P6	0.310 ± 0.010	P12	0.163 ± 0.005	P18	0.543 ± 0.005		



La concentración de sales en el suelo puede afectar el crecimiento y desarrollo de los cultivos, observamos en la tabla 18 y 19, que tenemos el P13 y P16 clasificados como moderadamente salino, siendo los únicos con mayor porcentaje de salinidad, posteriormente en muy ligeramente salino tenemos a los puntos 15, 20 y 23, y los puntos restantes presentan efectos despreciables de la salinidad, por lo cual, en términos agropecuarios sería un suelo adecuado para el crecimiento de cultivos (Luters y Salazar, 2000), debido a que sería óptimo para el crecimiento de las plantas tener bajo contenido de salinidad (Partida-Ruvalcaba et al., 2016), aunque en este caso es causado por el hidrocarburo por lo cual no sería un buen indicador.

Pero cabe destacar que tenemos la mayoría de los puntos contaminados con hidrocarburos con esta clasificación (observe tabla 23 y figura 15 y 17). Como menciona Álvarez-Jiménez et al. (2019) los suelos con presencia de crudo pesado presentan efectos despreciables de la salinidad, mientras que su suelo limpio (franco-arcilloso-arenosa) es moderadamente salino. Cabe destacar que no se tiene reportado otros efectos que cause la presencia de hidrocarburos en este parámetro.

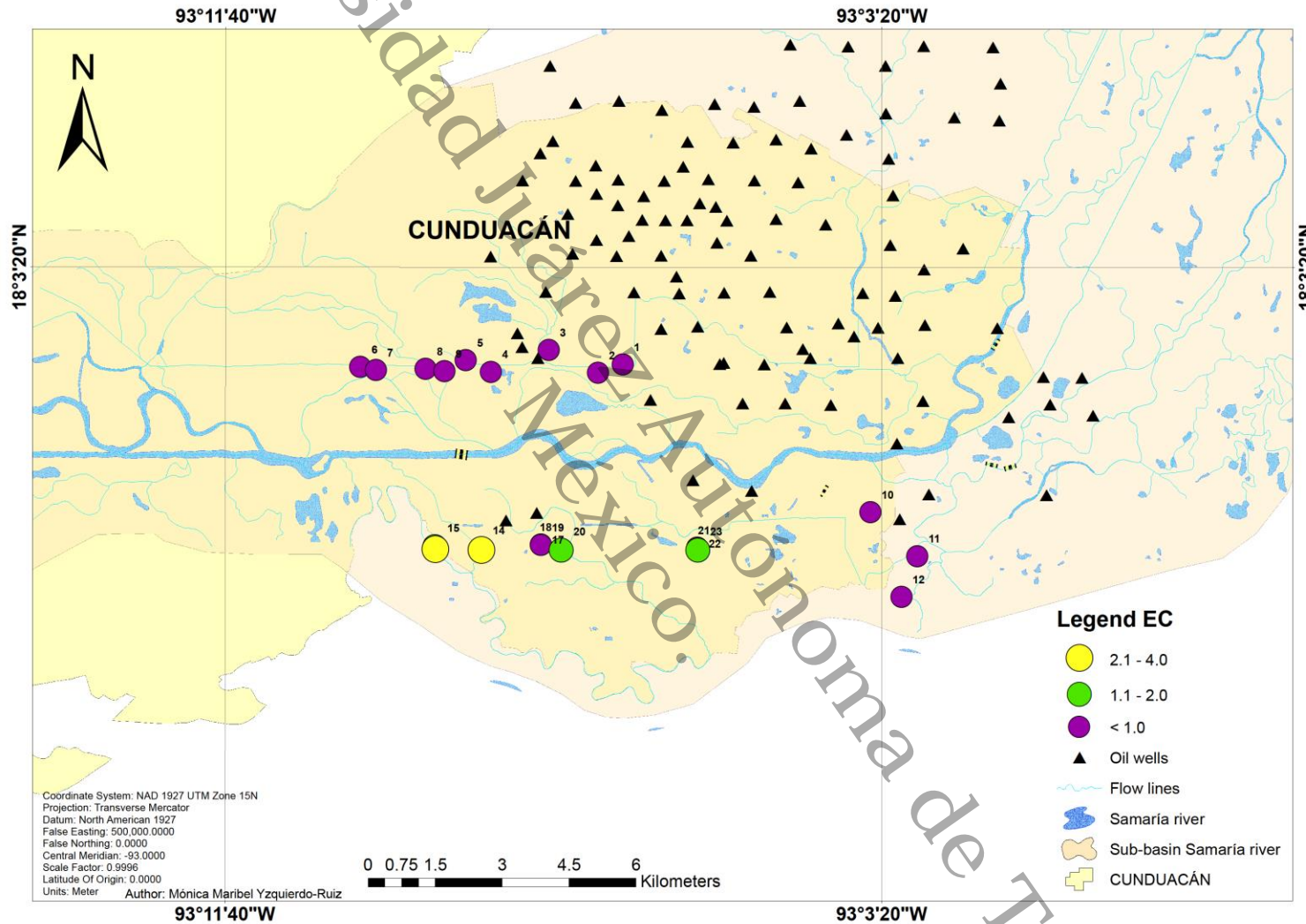


Figura 15. Mapa de distribución de CE.



6.2.4 Densidad Real (DR) y Densidad Aparente (DA)

La determinación de la Densidad Real (DR) fue realizada por el método AS-04, establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000, la cual es calculada con el conocimiento de solo dos valores, la masa y el volumen del suelo.

Mientras que la Densidad Aparente (DA) describe la compactación del suelo y la relación existente entre el sólido y los espacios porosos, se expresa en gramos por centímetros cúbicos, es importante mencionar que la DA varía con la textura que presenta el suelo y con su contenido de materia orgánica, y estacionalmente puede variar por los efectos de humedad principalmente en suelos arcillosos expansibles (Taboada & Álvarez, 2008; Keller & Håkansson, 2010).

Se realizaron la prueba ANOVA para ambos y tenemos que $p < 0.05$, de igual la prueba Tukey en la que para DR tenemos un $HSD < 0.476$, para el caso de la DA el $HSD < 0.190$. Los resultados se interpretan como en la tabla 4 según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Tabla 20. Clasificación de las 23 muestras analizadas de DA según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

TIPOS DE SUELO	$g \cdot cm^{-3}$	ID MUESTRAS
Orgánicos y volcánicos	< 1	Todos los demás restantes
Arcillosos	1.0 - 1.19	P2, P3, P4, P5, P10, P22
Francosos	1.20 - 1.32	P14, P17, P18, P19, P21
Arenosos	> 1.32	P8, P12, P20

Autores como Zavala et al., (2001) afirman que los suelos que presentan alta densidad aparente tienen problemas de porosidad, lo que impide la aeración y que las plantas puedan anclarse, mientras que Álvarez-Jiménez et al., (2019) en su comparativa con un suelo testigo y contaminado observaron un aumento mínimo de la DA con respecto del suelo testigo al intemperizado, por lo que no nos surgiere un indicador completamente confiable para comparar de forma precisa un suelo testigo



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



a uno contaminado, vemos en la figura 16 que tenemos toda la clasificación que la norma mexicana nos muestra.

Por otro lado, lo que observamos en la tabla 20, tenemos toda la variedad de tipos de suelo, estando la mayoría de nuestras muestras >1, lo que sugiere que se encuentran en el rango de suelos minerales, pero, aun así, es importante resaltar que 8 de las muestras se encuentran clasificadas como suelos orgánicos y volcánicos.

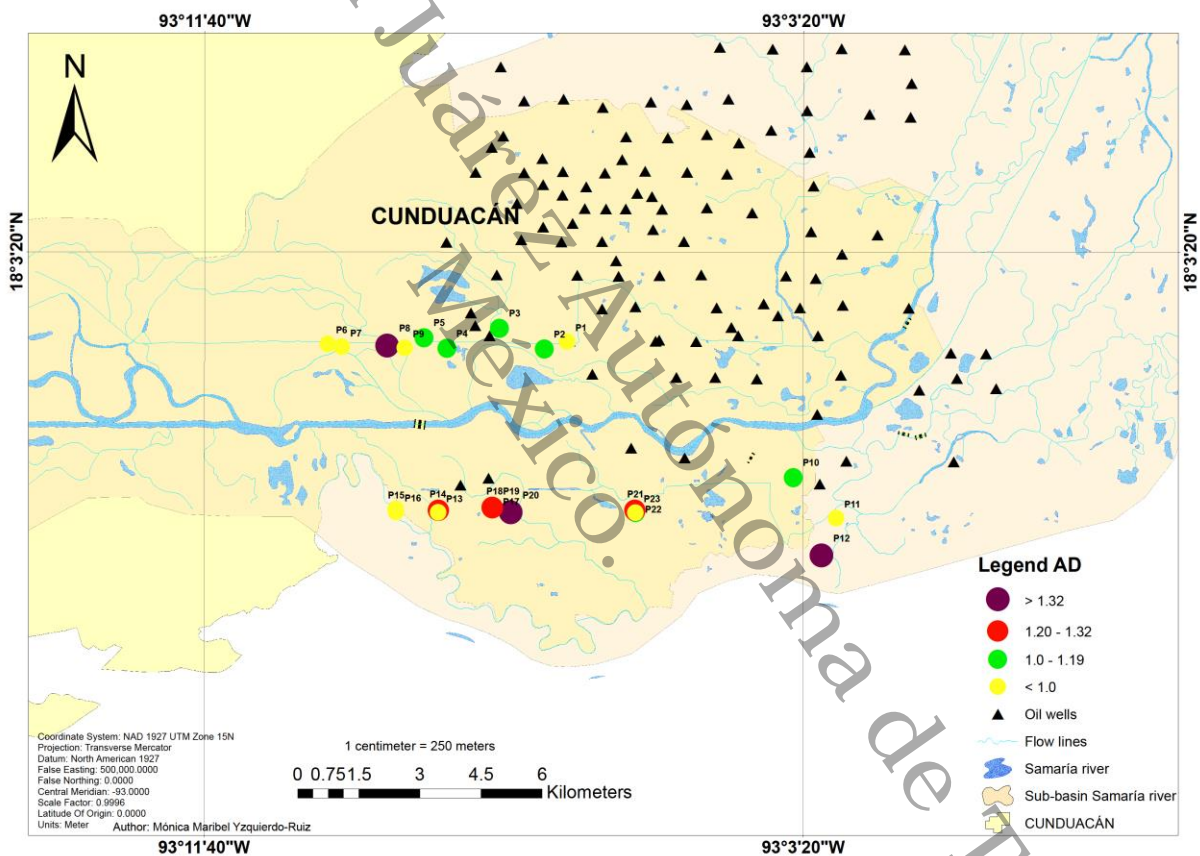


Figura 16. Distribución de las 23 muestras analizadas para la DA en la zona de estudio.



6.2.5 Análisis de porcentaje de Porosidad (%Po), Materia Orgánica (MO) y Capacidad de Campo (CC)

Los parámetros como porcentaje de Porosidad (%Po), Materia Orgánica (MO) y Capacidad de Campo (CC) son parámetros físicos muy importantes para el buen funcionamiento del suelo, ya que debido a su presencia tendrá implicaciones en la disponibilidad de las plantas lo que conlleva a la aeración y circulamiento del agua, debido a su impacto en las propiedades mecánicas (Yan, 2011; Wang et al., 2021).

Para suelos contaminados algunos autores mencionan que juegan un papel determinante, por ejemplo, en el caso del %Po, Álvarez-Jiménez et al., (2019) en su experimento al momento de contaminar el suelo observaron que el %Po disminuía drásticamente, llegando a valores negativos, llegaron a la conclusión al igual que Marín-García et al., (2016) que la presencia de hidrocarburos origina repelencia al agua.

Esta afirmación es totalmente contraria para nuestro caso, ya que nuestros resultados sugieren un %Po que empieza desde medianamente reducido, con los P8, P12 y P20 que, si están contaminados, pero observamos que los valores no son negativos; hasta muy amplio, estando la mayoría en el rango de alto (tabla 21). Esto se puede deber que en los climas tropicales puede no ser transitoria o persistente, debido a que en climas cálidos se dan las condiciones a que haya una rápida biodegradación (Takawira et al., 2014).

Tabla 21. Clasificación del %Po de las 23 muestras analizadas.

POROSIDAD (Po)	%	ID MUESTRAS
Muy reducido	< 25	-----
Reducido	25 – 30	-----
Medianamente reducido	36 – 45	P8, P12 y P20
Medio	46 – 50	P4, P14, P15, P16, P18 y P19
Medianamente amplio	51 – 55	P10, P17 y P21
Amplio	56 – 60	P2, P3, P5, P6, P7, P9, P13 y P22
Muy amplio	> 60	P1, P11 y P23



Otro indicador de repelencia al agua es la CC, [Marín-García et al., \(2016\)](#) menciona que una CC elevada presentan los suelos con hidrocarburos, pero observamos que en el estudio de [Álvarez-Jiménez et al., \(2019\)](#), los dos suelos, el contaminado y el no contaminado, se encuentran dentro de la clasificación de elevada, pero si se nota un aumento del intemperizado (contaminado) con respecto al otro. Podemos decir lo mismo para nuestro caso, debido a que todos se encuentran con una CC > 30 (tabla 22).

Tabla 22. Clasificación de la CC para las 23 muestras analizadas según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

CAPACIDAD DE CAMPO (CC)	CLASIFICACIÓN	ID MUESTRAS
< 7	Muy baja	
7.0 – 12	Baja	
12 – 20	Media baja	
20 – 30	Media	
>30	Elevada	Todos los puntos

La Materia Orgánica (MO) tiene una gran importancia ya que es un factor determinante para la formación del sistema edáfico, su evolución dentro del proceso de edafogénesis estará determinando los procesos biológicos, así como las propiedades físicas y químicas ([Aguilera, 2000](#)). Según la [FAO \(2009\)](#) lo define como el material de origen vegetal y microbiano (descompuesto y en descomposición). En la tabla 23 observamos que para los suelos minerales (no volcánicos) tenemos concentraciones de muy bajas, medio y alto, lo contrario ocurre con los suelos volcánicos que presentan todos una MO muy baja.

Tabla 23. Clasificación de la MO para las 23 muestras de suelo.

CLASE	MATERIA ORGÁNICA		ID MUESTRAS	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos	Suelos no volcánicos	Suelos volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5	P14, P17, P18, P19, P20, P21, P22	El resto de las muestras
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5		
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5	P2, P3, P4, P8, P10, P12	
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0	P5	
Muy alto	> 16.1	> 6.0		



6.3 Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)

Los suelos contaminados con hidrocarburos presentan cambios en la vegetación, conductividad eléctrica, pH, densidad aparente, porosidad y repelencia al agua, en este último, en los climas tropicales puede no ser transitoria o persistente, debido a que en climas cálidos se dan las condiciones a que haya una rápida biodegradación, aunque es importante mencionar que los trópicos experimentan condiciones de climas extremadamente calurosos, algunas estaciones son secas y otras húmedas, estas condiciones hacen que hayan diferentes tipos de suelos con diferentes características por lo que cada uno tendrán diferente comportamiento (Takawira et al., 2014).

Observamos en la tabla 24, que la mayoría de los puntos están contaminados con hidrocarburo, la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, establece límites máximos permisibles para suelos contaminados con hidrocarburo (tabla 25). Podemos observar comparando ambas tablas que todas nuestras concentraciones de hidrocarburo superan el LMP para el uso agrícola, residencial e industrial con los tres solventes (diclorometano, hexano y metanol) utilizados para determinar los HTP.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.



Tabla 24. Concentraciones de HTP para cada muestra con tres solventes diferentes (diclorometano, hexano y metanol).

ID	HTP	HTP	HTP	Fracción	Fracción
	Diclorometano	Hexano	Metanol	Media Tóxica	Pesada Repelente
P1	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0
P4	24000	6380	6000	27	73
P5	26000	0	6500	29	71
P6	20000	0	5000	29	71
P7	16000	0	10000	66	34
P8	6000	0	1500	29	71
P9	14000	0	3500	28	72
P10	38000	22000	12000	33	67
P11	0	0	0	0	0
P12	30000	24000	7500	28	72
P13	6000	4907	1500	25	75
P14	0	0	0	0	0
P15	23800	11900	10000	42	58
P16	0	0	0	0	0
P17	14000	13641	3500	25	75
P18	14000	13776	3500	25	75
P19	4000	3668	1000	25	75
P20	2000	1822	1250	62	38
P21	0	0	0	0	0
P22	4000	3196	1000	25	75
P23	10000	9450	3158	32	68



Tabla 25. Límites máximos permisibles según la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO
	Agrícola	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Ligera	200	200	500	NMX-AA-105-SCFI-2008
Media	1 200	1 200	5 000	NMX-AA-145-SCFI-2008
Pesada	3 000	3 000	6 000	NMX-AA-134-SCFI-2006

Por otro lado, se puede notar que nuestros resultados presentan diferentes valores en los tres tipos de solventes utilizados, lo mismo pasa con [Martínez-Chávez et al., \(2017\)](#) en los que observaron que había mayor extracción de hidrocarburo utilizando diclorometano que con hexano, en nuestro caso ocurre lo mismo, hay mayor extracción con diclorometano, seguido de hexano y por último con metanol.

Es importante mencionar los tipos de suelos presentes en la zona de estudio, debido a que cada uno tiene propiedades y características diferentes que hacen que los contaminantes se comporten de diferente forma (observe mapa de la figura 17), en los que tenemos Gleysols y Fluvisols.

Los *Fluvisols* que se encuentran en las llanuras aluviales altas presentan dispersión del hidrocarburo hacia el subsuelo, lo que permiten un mayor drenaje del agua lo que ocasiona que el desplazamiento del hidrocarburo sea por efecto de infiltración, hasta donde se encuentre el manto freático y al alcanzar este, empiece su desplazamiento en sentido paralelo al subsuelo ([Ordoñez y Schoroder, 2014](#)), es importante mencionar que [Zavala \(1993\)](#) y [Gutierrez y Zavala \(2002\)](#) afirman que los Fluvisols presentan una textura media, baja concentración de hidrocarburos, a pesar de estar sometidas a derrames de petróleo, debido a que se encuentran en relieves altos, exentos de inundaciones y tienen un buen drenaje interno que facilita el lavado de hidrocarburos.



En el caso de los *Gleysoles* tienen ligeras a altas concentraciones de hidrocarburo, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre, son susceptibles a inundaciones y la actividad biológica arrastra los hidrocarburos a través de los canales, lo que origina su fragmentación y las condiciones oxidantes para la precipitación de hierro (Gutiérrez y Zavala, 2002), algo que observamos en la micromorfología de suelos, muchos revestimientos de Fe (Figura 20), estos se encuentran en su mayoría en las zonas bajas aluviales, las cuales presentan una oportunidad de migración de hidrocarburos por la capacidad de retener agua, por el comportamiento del flujo hidrológico que puede presentar, y más que nada por las características del hidrocarburo que lo hacen inmiscibles y con menor densidad que el agua, se pueden desplazar por encima de esta hacia mayores áreas probablemente lejanas o hasta donde se empiece a ganar elevación (Ordóñez y Schroeder, 2014).

Prestar atención en el mapa, ya que la mayoría de los puntos se encuentran dentro de los *Gleysoles*, algo que podemos observar que solo tres puntos de los contaminados no se encuentran dentro los *Gleysoles*, este es un factor muy importante a considerar, debido a que la mayoría de los contaminados están presentes en este suelo, un suelo que por sus características facilita la migración de los contaminantes en épocas de inundaciones, podría ser el caso que tengamos suelos contaminados en la parte Oeste (observe en los mapa 17) donde ya no se encuentran cerca los pozos petroleros y por lo que un derrame precisamente en la ubicación de los puntos no sería el caso, así que nos encontramos en un caso de migración de contaminantes.



Lo que la literatura nos hace referencia que es común en las llanuras aluviales, denominada en la literatura inglesa como *floodplain*, en la cual sus sedimentos y suelos existentes son adquiridos por erosión o meteorización, como por su transporte a lo largo del sistema fluvial y su sedimentación, dentro de ellas existen depósitos de desbordamiento o de inundación denominados *overbank deposits*, los cuales tienen una gran representatividad en los estudios geoquímicos por ser un vertedero de contaminantes, como en este caso ([Adánez, P. et al., 2009](#)).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

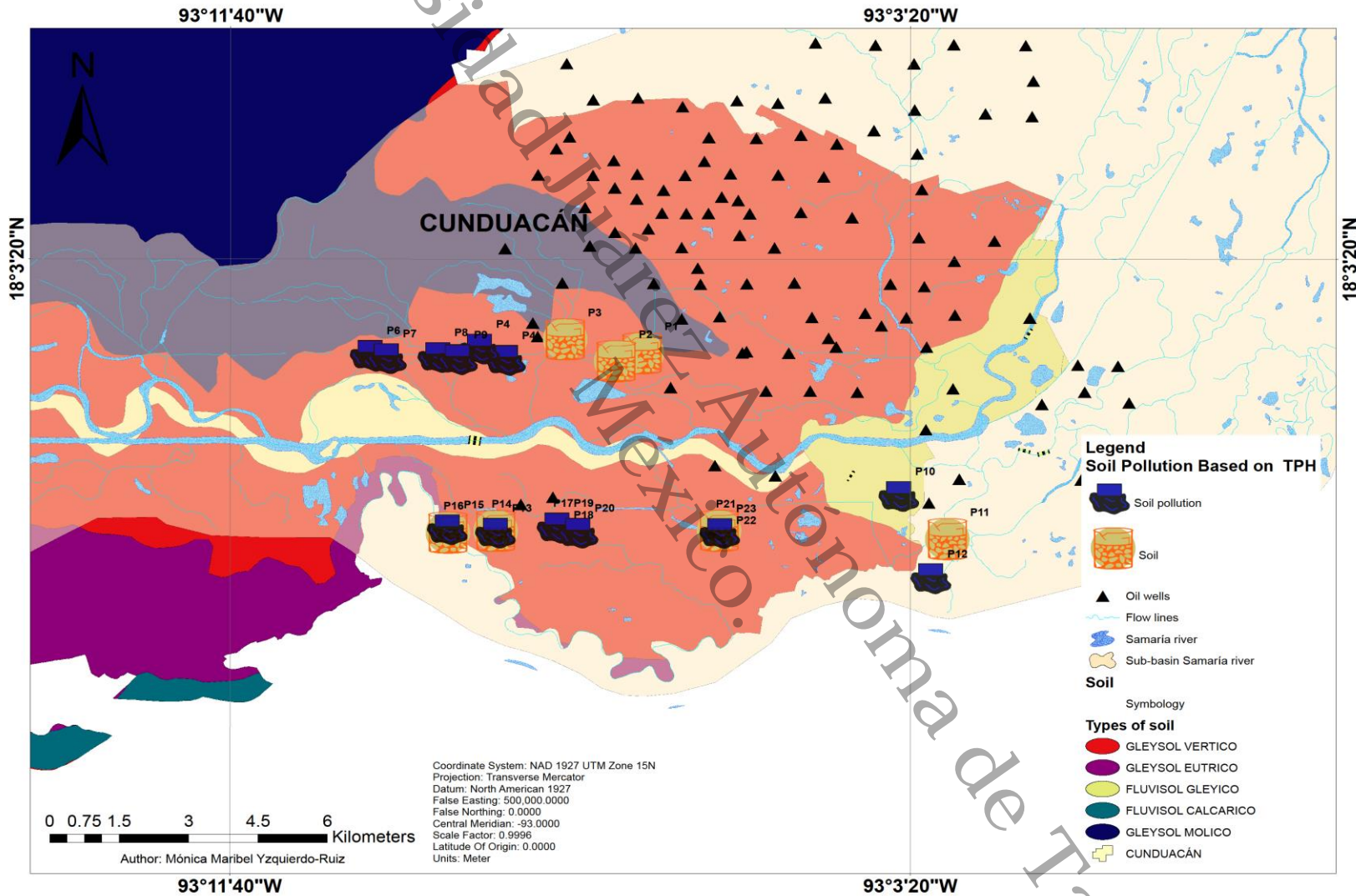


Figura 17. Distribución de las muestras contaminadas en la zona de estudio.



6.4 Análisis de las fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos (SARA)

En la tabla 26 se muestran las fracciones SARA, las cuales se dividen en saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos en porcentaje (%); de igual forma, se clasifican en porcentaje la fracción media, que corresponde a la parte toxica, y, por otro lado, la fracción pesada que corresponde a la parte repelente.

Tabla 26. Clasificación de las fracciones SARA.

ID	Fracciones SARA				Fracción Media	Fracción Pesada
	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfáltenos	Tóxica	Repelente
	%	%	%	%	%	%
P1	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0
P4	2	25	25	48	27	73
P5	4	25	0	71	29	71
P6	4	25	0	71	29	71
P7	4	62	0	34	66	34
P8	4	25	0	71	29	71
P9	3	25	0	72	28	72
P10	2	31	58	9	33	67
P11	0	0	0	0	0	0
P12	3	25	70	2	28	72
P13	0	25	57	18	25	75
P14	0	0	0	0	0	0
P15	0	42	50	8	42	58
P16	0	0	0	0	0	0
P17	0	25	72	3	25	75
P18	0	25	72	3	25	75
P19	0	25	73	2	25	75
P20	0	62	29	9	62	38
P21	0	0	0	0	0	0
P22	0	25	55	20	25	75
P23	0	32	63	5	32	68



Cabe destacar que los mayores porcentajes en la fracción media (tóxica) los presentan las muestras P7 (66%) y P20 (62%), las cuales presentan mayor porcentaje de aromáticos, es importante mencionar que los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs) están asociados con daños en la salud, aumentando la incidencia de diferentes tipos de cáncer ([Mastandrea et al., 2005](#)).

Por otro lado, teniendo el resto de los puntos con mayor porcentaje de fracción pesada (repelente), estudios como el de [Marín-García et al., \(2016\)](#) mencionan que los hidrocarburos de composición media presentan ligera repelencia, y los de fracción pesada son lo que presentan una alta repelencia al agua, lo que ocasiona que no haya una interacción suelo-agua, esto se puede deber a que contienen moléculas con grupos polares como los asfáltenos. La fracción más pesada de cualquier petróleo crudo depende del equilibrio entre los asfáltenos y las fracciones más ligeras del crudo ([Leontaritis y Mansoori, 1988](#)).

Los saturados comprenden los grupos de los no polares (parafinas, isoparafinas y naftenos) y es la fracción más importante del petróleo crudo. Los aromáticos contienen uno o más anillos aromáticos o tiofénicos y son hidrocarburos polarizables, por último, las resinas y los asfaltenos son fracciones que no son hidrocarburos y abundan en sustituyentes polares que contiene nitrógeno, azufre y/u oxígeno ([Bissada et al., 2016](#)).

6.5 Análisis por espectroscopía FTIR

Los extractos obtenidos de HTP fueron conservados para su posterior análisis de FTIR para conocer los grupos funcionales contenidos en las muestras. En la figura 18 se muestran los espectros obtenidos de dicho análisis, los cuales pertenecen al P4, P7, P10 y P15, debido a que el P1 no contiene hidrocarburo. La tabla 27 muestra los grupos funcionales relacionados a las bandas encontradas.

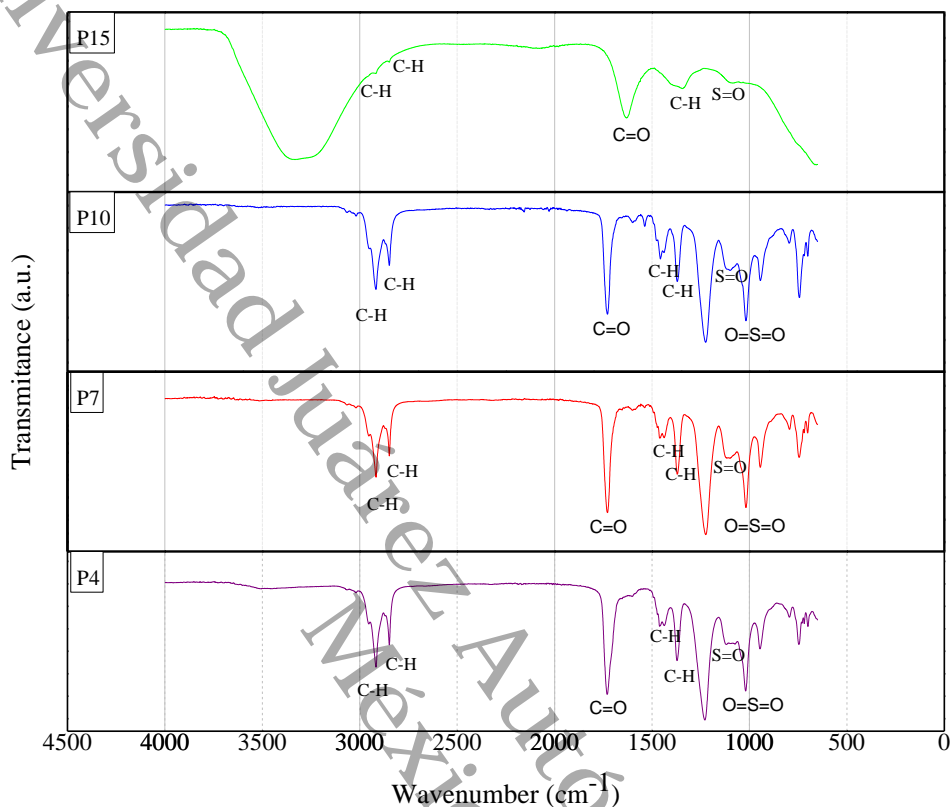


Figura 18. Espectrograma de FTIR para el P4, P7, P10 y P15.

Tabla 27. Grupos funcionales en número de onda encontrados.

Numero de onda	Vibración de enlace	Grupos funcionales	P4	P7	P10	P15	REFERENCIAS
1010-1020	C-O-C	Eter	X	X	X		Guzmán-Osorio et al., (2019)
1115-1130	O=S=O	Sulfonilo	X	X	X	X	Morales-Bautista et al., (2016)
1360-1370	C-H	CH3 (metilos)	X	X	X	X	Akmaz et al., (2011)
1430	C-H	CH2 (Metilenos)	X	X	X		Meléndez et al., (2012)
1650-1750	C=O	Grupo carbonilo	X	X	X	X	Morales-Bautista et al., (2016)
2800	C-H	CH3 (Metilos) Estiramiento simétrico	X	X	X	X	Morales-Bautista et al., (2016)
2900	C-H	CH2 (Metilenos) Estiramiento asimétrico	X	X	X	X	Akmaz et al., (2011)



Como observamos en la figura 18, se muestran cuatro espectros representando cada punto, con lo que respecta al P4, P7 y P10 encontramos grandes similitudes, conformando los mismos grupos funcionales (tabla 26), por lo que podemos decir que siguen la misma tendencia, lo que sugiera que, al tener similitudes en las bandas de absorción, el hidrocarburo presente puede ser de la misma fuente. Podemos notar que el P15 es el único que no sigue la misma tendencia.

En el rango de 1010 a 1020 cm^{-1} encontramos bandas de absorción para el P4, P7 y P10, en el que [Guzmán-Osorio et al., \(2019\)](#) menciona que para estos rangos se deben a eter (C-O-C), mientras que, [Morales-Bautista et al., \(2016\)](#) mencionan lo mismo, para la banda en $\sim 1021\text{ cm}^{-1}$. Por otro lado, encontramos bandas en el rango de 1115 a 1130 cm^{-1} , en el que [Morales-Bautista et al., \(2016\)](#) la asocian a sulfonilo (O=S=O) en 1152 cm^{-1} , de forma contraria en el rango de 1159 cm^{-1} [Asemani y Rabbani, \(2016\)](#) la asocian a compuestos aromáticos (C-H).

De 1360 a 1370 cm^{-1} se debe a la vibración C-H del grupo funcional metilos (CH_3) ([Akmaz et al., 2011](#) y [Asemani y Rabbani, 2016](#)). [Morales-Bautista et al., \(2016\)](#) nos menciona que dentro del rango $\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ está asociado a metilos y [Garmarudi et al., \(2019\)](#) nos dice que las bandas dentro de estos valores se deben a un estiramiento simétrico de C-H alifático.

Mientras que en el grupo de los metilenos (CH_2) encontramos los números de onda de ~ 1430 y $\sim 2900\text{ cm}^{-1}$ (C-H) que son reportados dentro de esos valores por [Melendez et al., \(2012\)](#) y [Akmaz et al., \(2011\)](#), es importante mencionar que, [Garmarudi et al., \(2019\)](#) presentan una banda de absorción en 2950 cm^{-1} , el cual también está asociado a un estiramiento asimétrico de C-H alifáticos.

Dentro del grupo carbonilo observamos una absorción intensa en las cuatro muestras (figura 18) dentro del rango de 1650 a 1750 cm^{-1} a un estiramiento de C=O en las que [Morales-Bautista et al., \(2016\)](#) reporto para hidrocarburos del estado de Tabasco de fracción ligera, media y pesada, en el mismo sentido, [Garmarudi et al., \(2019\)](#) reporta en su investigación sobre los constituyentes del crudo iraní, que para



el rango de 1635 a 1750 cm^{-1} se debe a un estiramiento C=O, afirmando lo dicho anteriormente.

En la siguiente figura 19 se muestran los espectros de las fracciones SARA del crudo analizado por Akmaz et al. (2011), en el que al comparar con nuestros resultados observamos que tenemos bandas de absorción similares para el grupo de asfaltenos y aromáticos, algo que podemos confirmar con los análisis SARA analizados en la tabla 26 es que tenemos mayor porcentaje en la mayoría de nuestras muestras de estas dos fracciones.

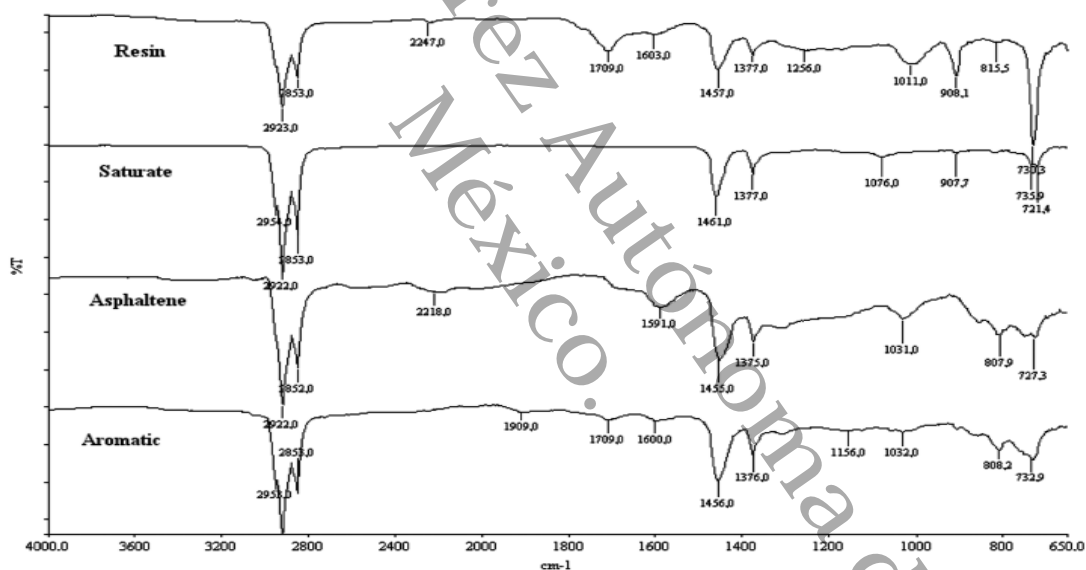


Figura 19. Espectro de fracciones SARA de FTIR de hidrocarburo de Batiraman Akmaz et al. (2011).



6.6 Análisis Químico y Mineralógico

6.6.1 Difracción de Rayos X

Cuando hablamos de la arcilla lo relacionamos como si solo fuera un término o una sola cosa, pero en términos generales la arcilla se refiere al conjunto de minerales de la arcilla. Los minerales de la arcilla son tan abundantes que se han convertido en los materiales más abundantes del siglo XX y tienen una gran representatividad en los estudios ambientales, así como civiles; cabe destacar, que la mayoría de estos minerales son silicatos hidratados pertenecientes al grupo de los filosilicatos y su estructura puede ser de dos tipos: arcillas 1:1 y 2:1, de igual forma se pueden encontrar en grupos de los aluminosilicatos, tectosilicatos y nesosilicatos (Huertos y Baena, 2008).

Huertos y Baena (2008) mencionan que los minerales de arcilla tienen valores determinados de superficie específica y de descomposición eléctrica, otro punto importante es que cuando presentan una superficie activa (tabla 28), como el caso de los filosilicatos del tipo 2:1 las posibilidades de adsorber metales son mayores. Dentro de los filosilicatos del tipo 2:1 tenemos a los grupos de las pirofilita-talco, esmectitas, vermiculitas, micas-ilitas y micas frágiles; dentro de los filosilicatos 1:1, grupos como caolinitas-serpentinatas.

Tabla 28. Minerales presentes en el suelo con su área superficial.

Minerales del suelo	Área superficial m ² /g
Caolinita	7 – 30
Ilita	65 – 100
Montmorillonita	700 – 800
Óxidos de magnesio	30 – 300
Goethita	40 – 80
Carbonatos y arenas	0.5 – 5

Observamos en el difractograma de la figura 20, el P1 (suelo no contaminado) hay un minerales del tipo 1:1 (caolinita), este tipo de arcillas se habían intuido en las



láminas delgadas (figura 1, P1) ya que los colores de interferencia nos brindan información del tipo de arcilla presente, colores de primer orden sugieren arcillas 1:1 y los colores de interferencia de segundo y tercer orden son característicos de arcillas 2:1, los cuales observamos colores de primer orden en su mayoría (Bullock et al., 1985; Gutiérrez-Castorena y Zavala 2003).

De igual forma tenemos la presencia de otros tipos de minerales como la anortita que es un aluminosilicato, el cual es un tipo de plagioclasa rica en Calcio (Ca), cristal que podemos observar en la petrografía, por otro lado, el alunogeno es otro mineral conformado por sulfatos de Aluminio (Al) y por último el cuarzo, el mineral más común en los suelos.

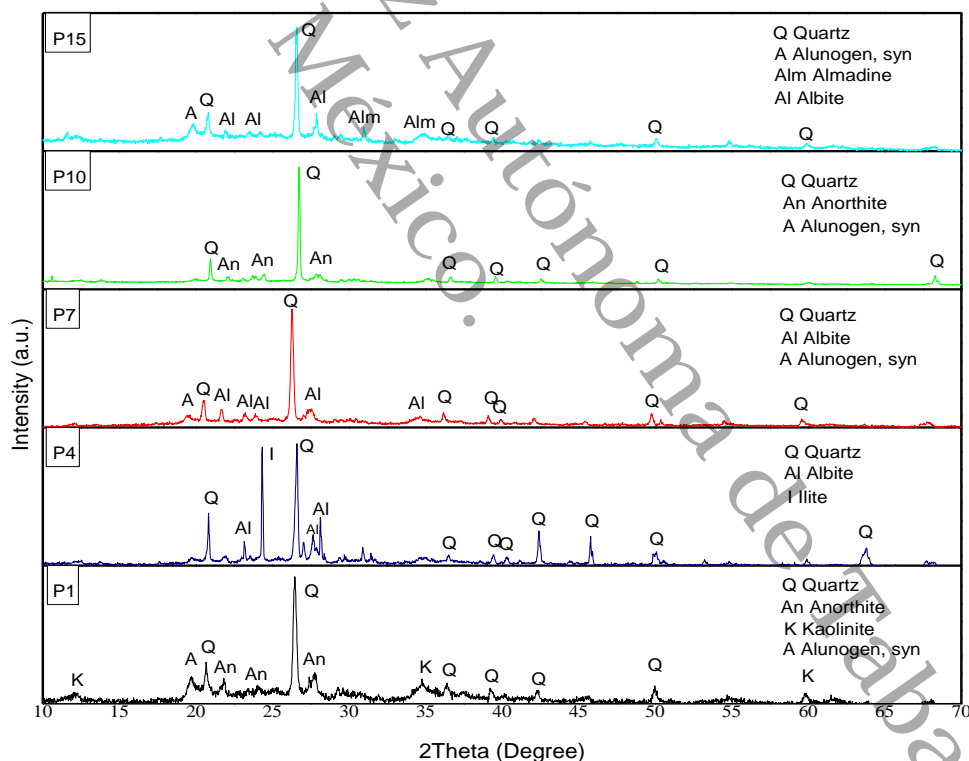


Figura 20. Diffractograma de muestras de suelo de cinco muestras (P1, P4, P7, P10 y P15).

Cartas cristalográficas: Cuarzo (Q) PDF 01-070-7344, Caolinita (K) PDF 00-014-0164, Ilita (I) PDF 01-078-5136, Anortita (An) PDF 00-020-0528, Alunogeno (Al) PDF 00-022-0022, Albite (Al) PDF 01-072-8434, Almadino (Alm) PDF 00-002-1007.



Observamos los minerales presentes en el P4 (suelo contaminado), en cual tenemos la presencia de cuarzo (mineral dominante en los suelos), albita e illita, este último es un filosilicato del tipo de arcilla 2:1 perteneciente al grupo de las micas, para el caso de este tipo de arcillas, que están clasificados en varios grupos según las cargas negativas en sus laminas y el contenido de K^+ en los espacios interlaminares aumentando, siguiendo el orden: esmectitas < vermiculitas < illitas < micas (Durán et al., 2017).

Las esmectitas son las que tienen mayor capacidad de intercambio catiónico y de expansibilidad de sus láminas por hidratación de sus cationes intercambiables, esto tendrá una influencia en la capacidad adsorbente de contaminantes, ya que da lugar a un aumento de la superficie accesible para la adsorción de moléculas orgánicas polares e iónicas. (MacEwan & Wilson, 1980; Permien y Lagaly, 1994; Duran Reina et al., 2017).

Aunque el área superficial de la illita sea menor que las del grupo de las esmectitas, aun así, tienen la capacidad de adsorción de metales que presentan el tipo 2:1, afirmando lo que dice Gutiérrez-Castorena y Zavala (2003) en que la micromorfología del suelo Gleysol para el área de Samaria presentan arcillas 2:1, debido a que por su naturaleza mineralógica presentan superficies activas, lo que permite la acumulación de hidrocarburos. No solo tenemos filosilicatos, sino también tectosilicatos como la albita que pertenece a las plagioclasas las cuales podemos observar en la petrografía (Figura 21 P4).

El difractograma del P7 igual pertenece a un suelo Gleysol Vertico, pero este no contiene filosilicatos, tenemos la presencia de albita y alunógeno el cual, este último es un aluminio sulfato, y suelo estar presente en aguas contaminadas por residuos de minas (García-Lorenzo et al., 2016).

En los suelos del tipo Fluvisol acumulación de hidrocarburo es menor debido a que presenta superficies menos activas como arcillas 1:1, pero para nuestras muestras no es el caso ya que no tenemos la presencia de filosilicatos en el P10, pero si



presencia de aluminosilicatos de calcio (Anortita) que suele ser un tipo de plagioclasas, los carbonatos suelen mantener en los suelos un pH alto lo que origina las condiciones para la precipitación de metales, algunos metales como el Cd tienden a quedar absorbidos en los carbonatos (Huertos y Baena, 2008). Para el caso del P15 solo tenemos albita y almadino, este último proviene del granate y suele estar acompañado de las hornblendas, un mineral presente en la petrografía (figura 21, P15A).

No obstante, los filosilicatos pasan a segundo término cuando hay presencia de oxihidroxidos de Fe, Mn y Al, y materia orgánica, debido a que tienen una alta capacidad sorcitiva para metales divalentes como Cu, Pb y en menor caso con Zn, Cr, Mo, Ni y As (Galán, 2000), algo que abunda en los cinco puntos. Zavala (1993) menciona que los suelos contaminados en la zona de Samaria presentan mayor abundancia de manchas rojizas (moteas).

Además, autores como Palma-Lopez y Cisneros (1997) mencionan que para los suelos de Samaria hay mucha presencia de óxidos de Fe y esto se debe a los rasgos hidromórficos y procesos redoximórficos, como son suelos de llanuras aluviales suelen ser inundables y es un ejemplo de un proceso de reducción.

Algo que pudimos ver en campo es que la mayoría de los suelos presentan moteas rojizas y en la micromorfología podemos observar revestimientos y nódulos de Fe y Mn, en la figura 21 P10A observamos un cristal fantasmal remplazado por óxidos de Fe, debido a que son suelos hidromórficos (formados por procesos de oxidación y reducción) y la presencia de estas moteas es el principal indicador de saturación de agua (Bouma y Van Schuylenborgh, 1969; Stoops y Eswaran, 1985).



6.6.2 Descripción Micromorfológica

En el P1 (figura 21) se observa una distribución porfírica abierta con agregados en forma de bloques subangulares, el color marrón o café simboliza el material fino (minerales del grupo de la arcilla) e hiporevestimientos de óxidos de Fe con límites difusos en la masa basal, la parte A es un nódulo nucleado moderadamente impregnado y el B un nódulo típico fuertemente impregnado de óxidos de Fe. Por otro lado, observamos la presencia de cristales de cuarzo muy pequeños, de igual forma tenemos la presencia de una plagioclasa sonada con macla de Karlsbad (Loaiza et al., 2015).

Por otro lado, el P4 presenta una textura granular con una masa basal oscura y una distribución quitónica en la cual el material fino (color marrón) rodea a los granos (hiporevestimientos de arcilla y de óxidos de Fe), los puntos marcados como C representan nódulos de contextura nucleada y el D nódulos del tipo morfológico agregado, ambos están moderadamente impregnados (Loaiza et al. 2014). A diferencia del P1, este es rico en cristales, tenemos la presencia de moscovita (color verde), de un tipo de anfíbol, algo de feldespato simple, plagioclasas y cristales de cuarzo.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

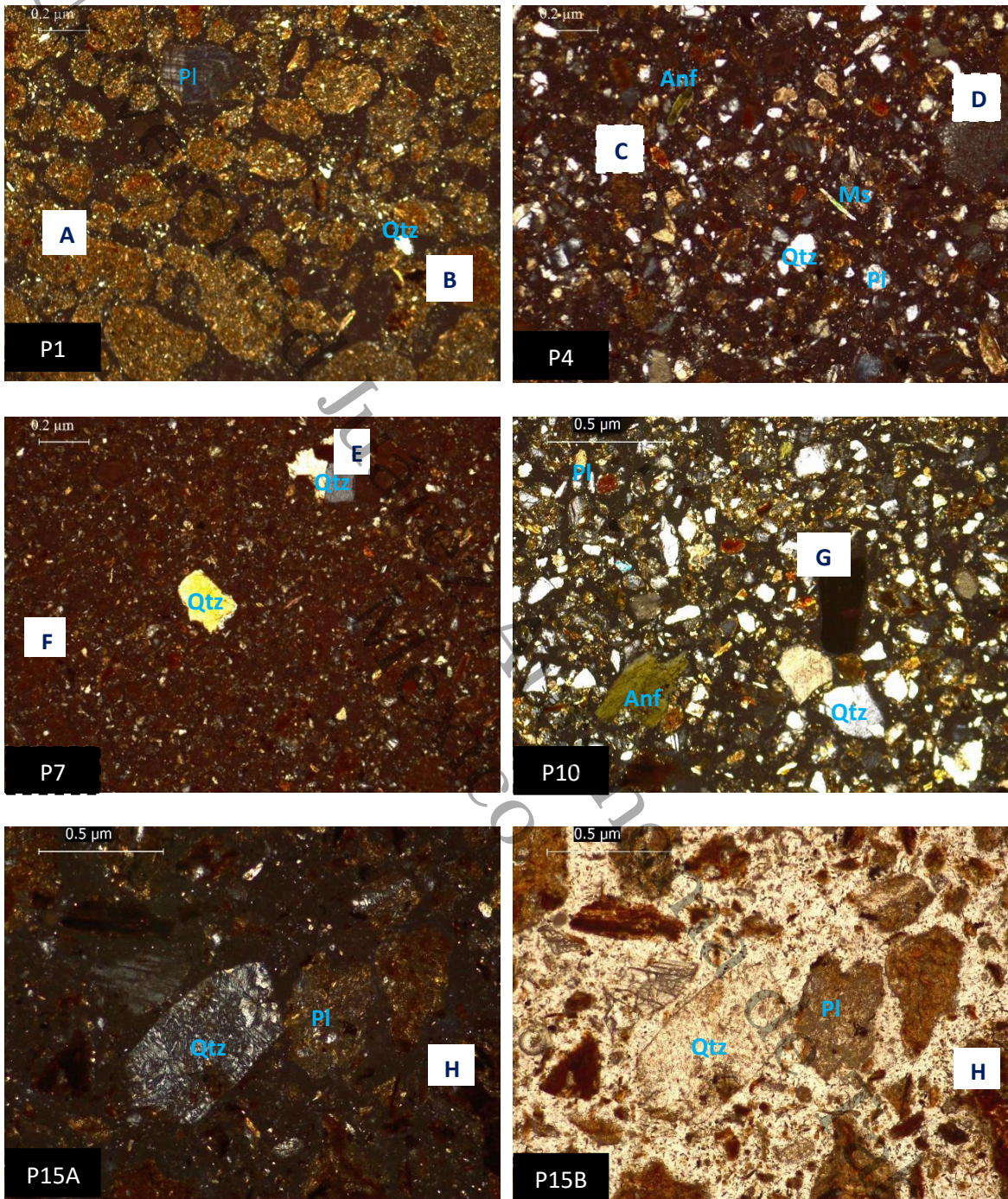


Figura 21. Microfotografías de suelo, la simbología que presenta PA son con luz polarizada y con PB están representadas con luz natural. P1, P4, P7 y P15 suelo del tipo gleysol; P10 suelo del tipo Fluvisol. Simbología: A nódulo nucleado moderadamente impregnado, B nódulo típico fuertemente impregnado, C nódulos de contextura nucleada, D nódulos del tipo morfológico agregado, E nódulo típico con impregnación pura, F hiporevestimiento de arcilla, G nódulo típico con impregnación pura y H intercalaciones de óxido de Fe. Qtz: Cuarzo, Pl: Plagioclasa, Anf: Anfíbol y Ms: Moscovita.



Con respecto al P7 observamos hiporevestimientos de arcilla y óxidos de Fe en toda la masa basal de color marrón, presenta una distribución combinada entre gefurica y de espaciado simple dentro de la plagioclasa hay la presencia de un nódulo típico con impregnación pura de óxido de Fe con bordes difusos (E), el punto F es un ejemplo de hiporevestimiento de arcilla en toda la masa basal y en los granos, con nódulos de agregados moderadamente a fuertemente impregnados de óxidos de Fe que solo se pueden observar con luz natural en los granos, los cuales presentan estas impregnaciones con los bordes difusos pero homogenizándose con el hiporevestimiento (Loaiza et al., 2015). La microfotografía es muy parecida a la del punto anterior, es muy cristalina pero la mayoría de los cristales son muy pequeños, solo se observan dos cristales grandes, que son cuarzos muy pocos pulidos.

Se puede apreciar un contraste con respecto al P10 y los puntos anteriores, ya no observamos ese hiporevestimiento de óxidos de Fe, en cambio la masa basal es de color gris. No obstante, tenemos la presencia de un cristal fantasmal con nódulo típico (G) con impregnación pura de óxido de Fe (color marrón) y lo que fuera ser hidrocarburo (marrón fuerte), de igual forma en la microfotografía observamos una textura granular, rica en cristales de cuarzos, plagioclasas con maclas polisintéticas y anfiboles (Loaiza et al., 2015).

En el caso para suelos del tipo Fluvisol la presencia de minerales de arcilla está relacionada con la presencia de hidrocarburo, pero como vimos en el difractograma no contamos con la presencia de este mineral, mientras que la actividad biológica tiene una tendencia a disminuir (Neuhauser et al., 1989; Gutiérrez y Zavala, 2002). La micromorfología del P15 fue una distribución porfírica respectivamente cerrada, hay cristales bien formados como cuarzos y plagioclasas de origen ígneo, las cuales presentan nódulos del tipo agregado y una impregnación moderada de óxidos de Fe. De igual forma observamos intercalaciones de óxido de Fe en algunas partes (H) (Loaiza et al., 2015).



6.6.3 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) en suelos

Cabe destacar que se realizó un análisis elemental por medio de SEM-EDS para cinco muestras ya anteriormente mencionadas; esta técnica, nos brinda imágenes de la morfología, espectrogramas de energías dispersivas, mapas de la distribución de la composición química elemental de los diferentes compuestos (anexos) del suelo y la distribución estructural de los metales presentes, observemos la tabla 29 donde se encuentra la información de las muestras del P1, P4, P7, P10 y P15.

Tabla 29. Información del análisis elemental por medio de SEM-EDS.

Análisis Elemental					
Formula	P1	P4	P7	P10	P15
Química	% Masa	% Masa	% Masa	% Masa	% Masa
C	11.36	12.16	11.85	12.44	24.19
O	45.84	45.32	45.82	44.75	44.37
Na	0.73	1.51	0.88	1.21	0.00
Mg	1.57	1.32	1.92	1.39	1.10
Al	10.31	8.63	9.35	9.05	6.49
Si	22.05	22.91	22.43	22.56	13.12
K	1.88	1.48	1.83	1.80	1.04
Ca	1.44	1.50	1.43	1.78	2.18
Fe	4.82	5.17	4.63	5.01	3.69
Ti	0.00	0.00	0.49	0.00	0.26
Mo	0.00	0.00	0.00	0.00	3.64
Total	100	100	100	100	100

Las muestras analizadas tienen una composición elemental a base de los elementos expuestos en la tabla anterior, podemos observar que los elementos predominantes para las cinco muestras fueron los siguientes (los cuales van de mayor a menor), Oxígeno (O), Silicio (Si), Carbono (C), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Potasio (K), Magnesio (Mg), Calcio (Ca), y Sodio (Na). Estos elementos forman parte de la composición de los suelos como macronutrientes y micronutrientes. Por otro lado,



encontramos Titanio (Ti) y Molibdeno (Mo), Ti para el P7 y P15, Mo solo para el P15, estos elementos no son comunes en la composición natural de los suelos.

Es importante mencionar que los espectrogramas de energía dispersiva obtenidos por EDS muestran las energías dispersivas asociadas a los elementos presentes en las muestras analizadas. Observemos el espectrograma del P1 (figura 22), como vimos en la tabla anterior que el Oxígeno (O) es el elemento más abundante, y el menos abundante el Na, lo que refuta los resultados de la CE en la que está clasificado con efectos despreciables de la salinidad.

Todas las muestras analizadas contienen elementos como Al > Fe > Mg (orden de mayor a menor concentración), lo cual nos ayuda a complementar con los rasgos encontrados en la petrografía (laminas delgadas), como lo son los revestimientos y nódulos de óxidos que encontramos en la petrografía. Con respecto a la micromorfología, el P1 presenta una distribución granular heterogénea (granos pequeños y grandes).

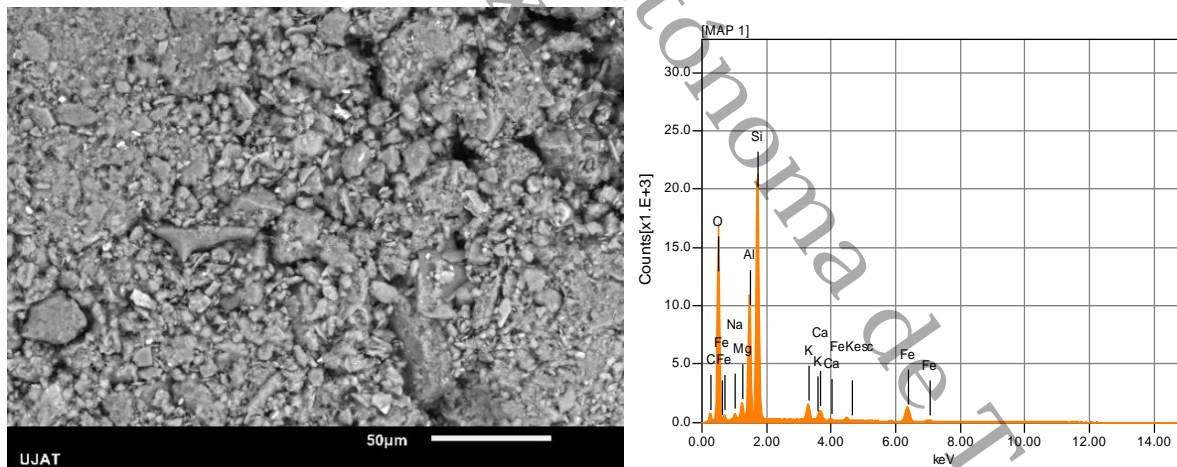


Figura 22. Microfotografía y espectrograma del P1 SEM-EDS.

Por otro lado, es importante mencionar un contraste debido a que en la micromorfología del P4 (figura 23), las partículas del suelo parecieran estar más grandes en comparación con el P1 que es el suelo no contaminado, lo mismo pasa con los P7, P10 y P15, siendo más notorios en el P15 debido a que parece que las partículas del suelo están homogenizadas y no están distribuidas en forma de granular, se observa una superficie con pocos granos pequeños encima.

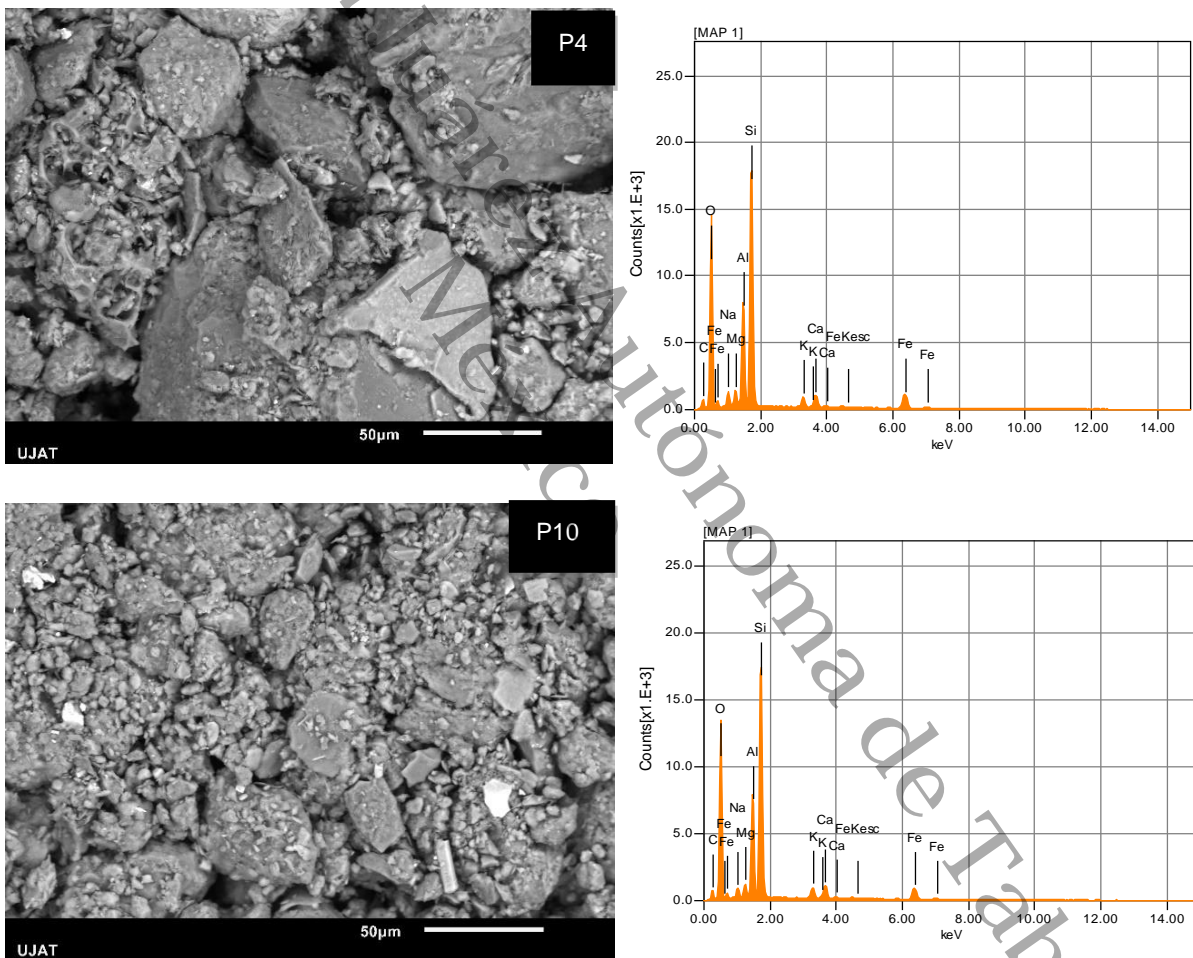


Figura 23. Microfotografía y espectrograma del P4 y P10.



A diferencia de los otros puntos, para el P7 (figura 24) encontramos la presencia de Ti (0.49 % masa), lo mismo encontramos en el P15 (figura 24), pero a una concentración menor (Ti a 0.26 % masa), por lo contrario, a el resto de las muestras analizadas, en este último se encontró la presencia de Mo (3.64% masa). No solo la presencia de estos metales (Ti y Mo) hacen diferente al P15, otra peculiaridad es que presenta un 0.00 % masa de Na, en el caso del O, Mg, Al, Si, K y Fe presentan el nivel más bajo.

Está reportado que el Ti y el Mo está presente en los hidrocarburos, por ejemplo, en la producción de catalizadores gastados de los procesos de hidrotratamiento de hidrocarburos pesados, estos contienen cantidades importantes de metales pesados como lo son el Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Cobalto (Co) y Vanadio (V) (Alonso et al., 2008), no solo estos metales pueden contener los hidrocarburo, sino también, Hierro (Fe), Cromo (Cr), Aluminio (Al), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Estaño (Sn), Plata (Ag), Antimonio (Sb) y Titanio (Ti) (de Viana et al., 2003; Almeida et al., 2015).

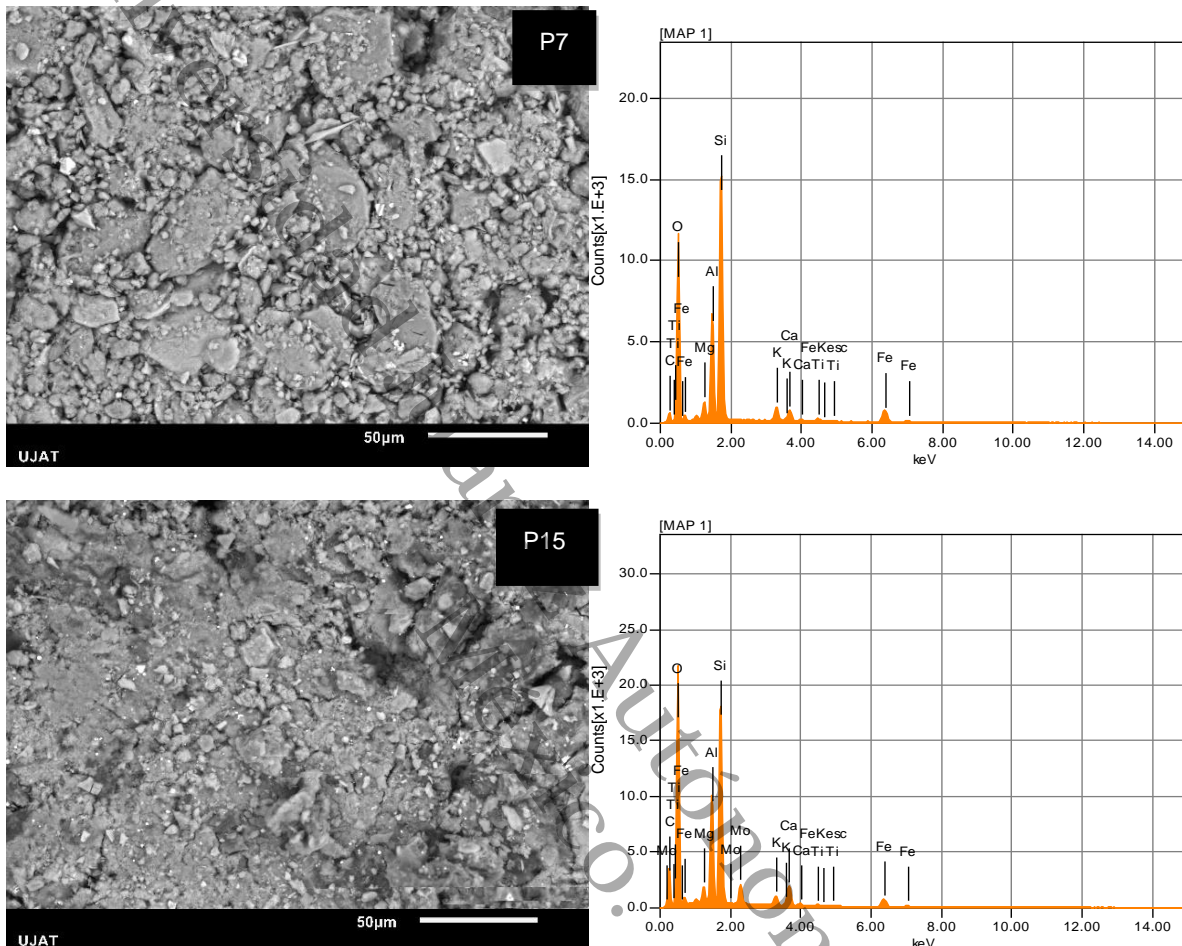


Figura 24. Microfotografía y espectrograma del P7 y P15.

La información que nos da el análisis de SEM-EDS, nos brinda mapas en los que se muestra la distribución de los elementos, por lo que podemos visualizar que habrá elementos que se encuentren en la misma posición y así dar una explicación de tentativos compuestos en nuestras muestras. Arenas-Lago et al., (2016) en su investigación mencionan que técnicas como SEM-EDS asocian la interacción de los metales pesados con los diferentes componentes del suelo.



6.7 Metales

Como en el caso del análisis mineralógico solo se determinaron las mismas cinco muestras (P1, P4, P7, P10 y P15), en la tabla 30 encontramos los resultados de los metales analizados de estas mismas.

Tabla 30. Metales analizados por medio de espectroscopia de absorción atómica.

ID	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Na	K
<i>mg·kg⁻¹</i>							
LD	0.0023	0.00912	0.0007	0.0087	0.007	0.0003	0.0008
P1	20.913	52.283	71.930	20.601	28.537	358.700	1234.612
P4	10.125	32.625	38.067	<LD	16.083	256.250	491.479
P7	17.782	71.380	55.954	8.683	40.521	159.530	451.329
P10	11.748	28.703	41.476	1.729	16.497	243.286	627.616
P15	33.619	72.655	80.095	7.020	25.163	287.856	636.781
ID	Mg	Mn	Fe	V	Ca	Ba	Cd
LD	0.0002	0.0024	0.0048	0.0484	0.0029	0.035	0.0014
P1	5130.077	519.501	16550.330	30.678	3321.034	231.212	<LD
P4	4535.889	200.792	9391.350	22.058	2848.983	116.125	<LD
P7	5124.181	324.059	13188.620	29.460	2573.126	154.615	<LD
P10	4066.360	194.339	8954.837	21.596	2261.879	115.521	<LD
P15	4145.198	154.641	17065.209	31.511	4153.290	66.196	<LD

Donde LD es Limite de Detección.

Cabe destacar que los clasificaremos como macronutrientes (K, Ca, Na y Mg), micronutrientes (Cu, Mn, Zn y Fe) y metales pesados (Cr, Ni, Pb, Ba y V) para su discusión. De las cinco muestras analizadas se detectaron 13 de 14 metales analizados, siendo el Cd el único no encontrado debido a que estuvo por debajo del Límite de Detección (LD) del equipo de Absorción Atómica por Flama.



6.7.1 Macronutrientes

En el siguiente histograma (figura 25) se muestran la concentración de los macronutrientes los cuales son K, Ca, Na y Mg en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, podemos observar mayor concentración de $\text{Mg} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Na}$.

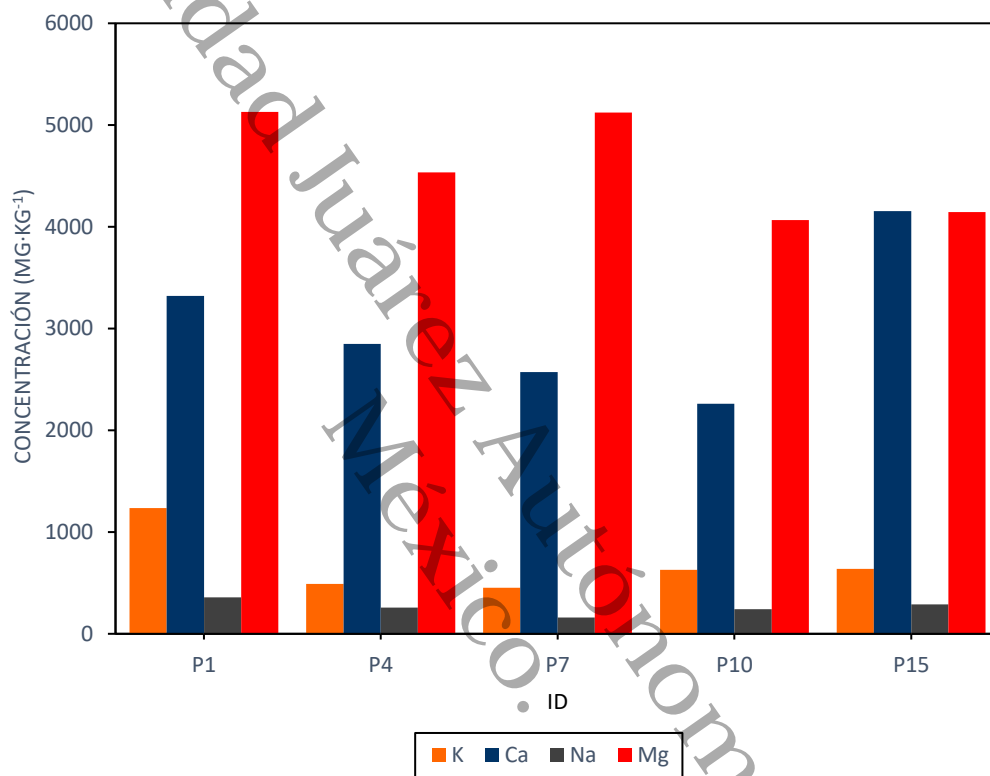


Figura 25. Histograma de macronutrientes (K, Ca, Na y Mg) para el P1, P4, P7, P10 y P15).

Tabla 31. Concentraciones de K, Ca, Na y Mg en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

ID	K	Ca	Na	Mg
P1	1234.612	3321.034	358.700	5130.077
P4	491.479	2848.983	256.250	4535.889
P7	451.329	2573.126	159.530	5124.181
P10	627.616	2261.879	243.286	4066.360
P15	636.781	4153.290	287.856	4145.198



El macronutriente más abundante en las cinco muestras de suelo fue el ion Magnesio (Mg), observando la tabla 31, podemos notar que tenemos la mayor concentración en el P1 ($5130.077 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), siguiendo con el P7 ($5124.181 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P4 ($4535.889 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P15 ($4145.198 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y por último el P10 ($4066.360 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Con respecto a la mineralogía, el P4 es el único que presenta un mineral con contenido de Mg, el cual es la illita $((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$ con una gran capacidad de retener metales pesados (Durán, 2017), de igual forma en los espectrogramas de SEM-EDS y en los mapeos observamos la presencia de este mineral.

Por otro lado, es importante mencionar que las investigaciones de Wyszkowski y Sivitskaya (2012) y Okoro et al., (2011) mencionan que en un suelo contaminado con hidrocarburo hay una alta concentración de Mg a diferencia de suelos no contaminados, aunque el P1 que es un suelo no contaminado tiene la más alta concentración, los demás puntos si se encuentran contaminados y, aún así presentan concentraciones altas, muy parecidas a las del P1.

El segundo macronutriente más abundante es el ion calcio (Ca), la concentración más alta la encontramos en el P15, en el siguiente orden $\text{P15} > \text{P1} > \text{P4} > \text{P7} > \text{P10}$ (ver tabla 32). Lo mismo ocurre con los resultados de SEM-EDS, el P15 presenta la mayor concentración (tabla 28) y en los mapeos (figura 32, Anexos) se observa que está presente en las cinco muestras. En el caso de la mineralogía (análisis de DRX), el P1 y P10 son ricos en un aluminosilicato de calcio (anortita), el cual Santos et al., (2005) menciona que la presencia abundante de Ca en el suelo se debe a la presencia al grupo de estos minerales. Reis et al., (2014) en sus investigaciones mencionan que una fracción importante de Pb está asociada a la presencia de carbonatos de Ca.



En menor concentración tenemos a los macronutrientes potasio (K) y sodio (Na), en el caso del K tenemos la mayor concentración en el P1 ($1234.612 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el mismo comportamiento para este punto ocurre en los resultados de SEM-EDS (tabla 29), por otro lado, de acuerdo con la mineralogía se encontró la presencia de illita $((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$ el cual es un filosilicato y para su composición necesita de este elemento.

En el caso del Na, se presentan las menores concentraciones de los macronutrientes, comparando los resultados de la conductividad eléctrica concuerda, ya que, para los P1, P4, P7 y P10 presenta efectos despreciables de la salinidad y el P15 muy ligeramente salino; en el caso del análisis elemental SEM-EDS, el Na es el elemento con menor concentración en %masa, teniendo en el P15 0.000 %masa (tabla 29). En cuestión con la mineralogía el P4, P7 y P10 contiene albita $(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)$, el cual está compuesto por este elemento.



6.7.2 Micronutrientes

En los siguientes histogramas (figura 26) se muestran la concentración (tabla 31) de los micronutrientes, los cuales son Fe, Cu, Zn y Mn en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, podemos observar mayor concentración de $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$ en ese orden.

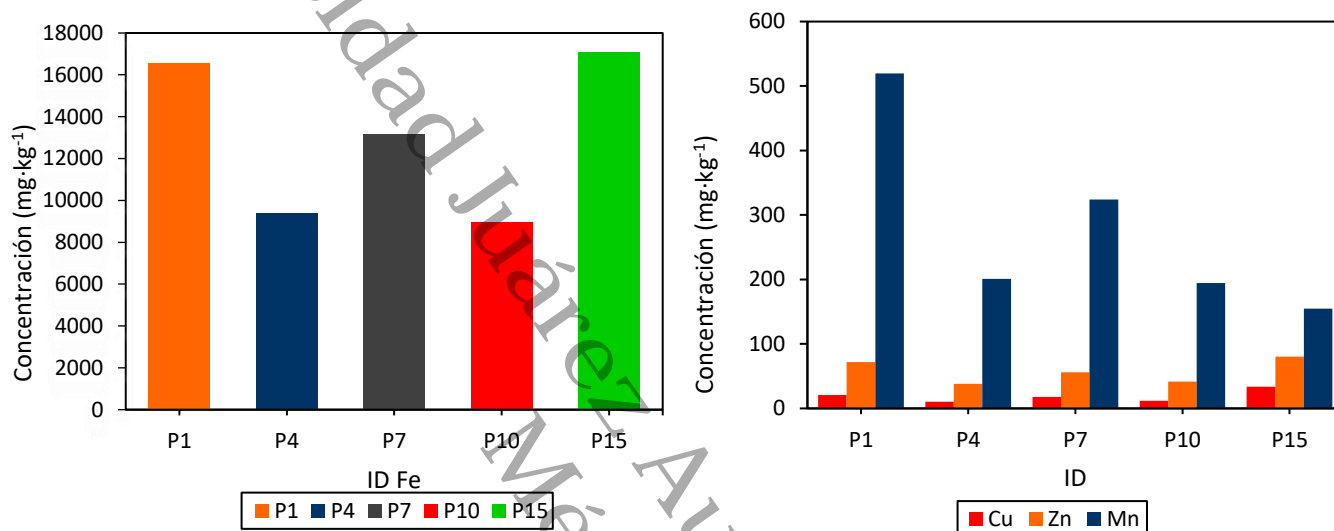


Figura 26. Histogramas de los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) contenidos en el suelo para el P1, P4, P7, P10 y P15.

Tabla 32. Concentraciones de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

ID	Fe	Mn	Zn	Cu
P1	16550.330	519.501	71.930	20.913
P4	9391.350	200.792	38.067	10.125
P7	13188.620	324.059	55.954	17.782
P10	8954.837	194.339	41.476	11.748
P15	17065.209	154.641	80.095	33.619

Los resultados fueron comparados con los valores que permiten clasificar los micronutrientes según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (tabla 33), en los que observamos que para Fe tenemos un nivel adecuado, siendo la misma clasificación para todos los demás micronutrientes.



Tabla 33. Valores de micronutrientes requeridos en el suelo según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clase	Fe	Cu	Zn	Mn
	<i>mg·kg⁻¹</i>			
Deficiente	< 2.5	< 0.2	< 0.5	< 1.0
Marginal	2.5 - 4.5		0.5 - 1.0	
Adecuado	> 4.5	> 0.2	> 1.0	> 1.0

Comparando los límites permisibles para metales en diferentes países, encontramos una gran diferencia, observamos en la tabla 34 valores para cinco países, decidimos comparar con estos debido a que se consideran que cuentan con las mejores normativas para metales pesados.

Los estándares de calidad de Canadá son uno de los mejores del mundo, otros países como Australia, Nueva Zelanda y Sudafrica se han basado en su normativa para clasificar los límites de contaminantes en el suelo (Heemsbergen et al., 2009, DEA, 2010). Cabe destacar que la normativa canadiense es similar a la Rusia ya que toman en cuenta los metales pesados derivados de la contaminación por hidrocarburo.

Tabla 34. Límites máximos permisible de diferentes países. RSL: Regional screening levels, A: Agricultura, R: Residencial, C: Comercial e I: Industrial. HS 2.1.7.2511-09," 2009, State standart 2.1.7.2041-06, (2006)¹, Lijzen et al., (2001)², EPA US (2019)³, CEQG (2019)⁴, NOM-004-SEMARNAT-2002⁵.

Metales	Rusia ¹	Holanda ²	USA ³	Canadá ⁴				México ⁵
<i>mg·kg⁻¹</i>			RSL	A	R	C	I	
Mn	1500	----	180	----	----	----	----	----
Zn	110	350	----	250	250	410	410	7500
Cu	66	96	310	63	63	91	91	4300

El macronutriente más abundante es el hierro (Fe), teniendo su mayor concentración en el P15 (17065.209 mg·kg⁻¹) y su menor concentración en el P10 (8954.837 mg·kg⁻¹), cabe mencionar, que en se encuentra en un nivel adecuado según la NOM-O21-SEMARNAT-2000 (>4.5 mg·kg⁻¹), superando el valor establecido por la norma mexicana. Observemos la tabla, que existe una tendencia



en la cual las mayores concentraciones ($>10000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se encuentran en el P1, P7 y P15, las cuales presenta una textura clasificada por la WRB como siltic (limosa y franco limosa).

Esta relación concuerda con lo establecido por [Moskovchenko et al., \(2017\)](#) en la que establece que la alta concentración de Fe en suelos afectados por la industria petrolera está relacionada con texturas con mayor presencia de limos, por un lado, las concentraciones más bajas las relaciona con suelos con mayor presencia de arenas, algo que ocurre en el P4 y P10 (franco-arenosa). Teniendo en cuenta que, [Muggler et al., \(1999\)](#) reportó que existe una mayor agregación de óxidos e hidróxidos de Fe en las partículas del tamaño de los limos, algo que podemos notar es que este tamaño de partícula media es la dominante en nuestras muestras (tabla 35) y en las láminas delgadas se observan estos revestimientos y nódulos.

En el caso del pH no hay una tendencia que nos indique una relación (tabla 35), ya que en los suelos limosos (siltic) solo dos presentan un pH igual, lo mismo ocurre en el sentido contrario. Con respecto a la mineralogía, el P4 contiene el mineral illita $((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$, el cual tiene la presencia de Fe; y el P15 presenta almadino $((\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3)$, que es un mineral rico en hierro.

No obstante, [Besoain, \(1985\)](#) y [Acevedo-Sandoval et al., \(2004\)](#) mencionan que este elemento se forma en los suelos por diferentes procesos biogeoquímicos y suele estar representados como óxidos o hidroxidos de Fe que generan marcas en los suelos (nódulos) representados por colores llamativos como rojos, amarillos y pardos, no existen suelos en los que no estén presentes, de igual forma, [Reis et al., \(2014\)](#) y [Arenas-Lago et al., \(2016\)](#) encontraron que este elemento puede estar asociado a la retención de metales pesados.

Cabe destacar que la presencia de Fe en los suelos está determinada por la presencia de la materia orgánica y de los minerales primarios ferromagnesianos, como los filosilicatos, que están presentes en el P1 (caolinita) y P4 (illita) (tabla 35); la forma en que se presenta este elemento principalmente en el suelo es como óxido



e hidróxido de Fe (III), estos tienen la capacidad de adsorber minerales arcillosos (filosilicatos), sílice (cuarzo) y materia orgánica.

En este sentido, [Zhang et al., \(1997\)](#) y [Acevedo-Sandoval et al., \(2004\)](#) destacan que el Fe en este estado se encuentra cubriendo partículas minerales y en agregados de arcillas, también enfatizan en la importancia de su función como secuestrador de elementos trazas y contaminantes. Explican que el Fe constituye un grupo de coloides que pueden adsorber amplias cantidades de metales, por lo que limita la disposición de estos en los suelos. Por estas razones muchas propiedades de los suelos dependerán del Fe. Lo anterior puede tener relación con nuestros resultados ya que coinciden con los metales como Cu, Pb, V, Zn y Ni, así como, silicato y molibdato fueron encontrados en las muestras de suelo analizadas, aunque no se determinaron Co y fosfatos.

Por otro lado, hay que mencionar que la interacción de los óxidos de Fe con los minerales arcillosos depende del pH, a bajos pH estos se van a precipitar en estos minerales, cuando se hayan revestidos o puestos en forma de nódulos, estos estarán en una forma estable cuando lleguen a un pH elevado, algo que podemos observar en nuestros puntos es que presentan un pH medio a alto ([Peackok y Rimmer, 2000](#); [Acevedo-Sandoval et al., 2004](#)).

En lo que respecta a la textura [Muggler et al., \(1999\)](#) reportó que existe una mayor agregación de óxidos e hidróxidos de Fe en las partículas del tamaño de los limos, algo que podemos notar es que este tamaño de partícula media es la dominante en nuestras muestras y en las láminas delgadas se observan estos revestimientos y nódulos.



Tabla 35. Relación de los metales con la textura, mineralogía y pH.

ID	Textura	Fe	Mn	Zn	Cu	pH
<i>mg·kg⁻¹</i>						
P1	Limosa	16550.330	519.501	71.930	20.913	M. Alcalino
P4	Franco arenosa	9391.350	200.792	38.067	10.125	M. Alcalino
P7	Franco limosa	13188.620	324.059	55.954	17.782	M. Alcalino
P10	Franco arenosa	8954.837	194.339	41.476	11.748	Neutro
P15	Franco limosa	17065.209	154.641	80.095	33.619	M. Acido
ID	AS de Ca	Tectosilicato	Sulfato de Al	Filosilicato	Nesosilicato	Silicato
P1	Anortita		Alunógeno	Caolinita 1:1		Cuarzo
P4		Albita		Ilita 2:1		Cuarzo
P7		Albita	Alunógeno			Cuarzo
P10	Anortita		Alunógeno			Cuarzo
P15		Albita	Alunógeno		Almadino	Cuarzo

En el caso del manganeso (Mn), se apreció que para la normativa estadounidense se rebasa el límite establecido ($180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) para los P1, P4, P7 y P10 (tabla 34), lo que ocasionaría problemas en la salud humana debido a su ingestión, aunque en la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 establece que se encuentra en un nivel adecuado como micronutriente en el suelo cuando es mayor a $>1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, presentando un valor muy alto de lo establecido en la norma. Se logró observar de acuerdo con la tabla 35 que las mayores concentraciones se encuentran cuando la textura pertenece al grupo de los limos, y pueden estar retenidos en los filosilicatos presentes en los P1 y P4, y en los óxidos de Fe que presentan todos.

Este metal (Mn) es común encontrarlo como concreciones de óxido e hidróxido en el suelo, como en el caso de los micronutrientes, se considera esencial en la nutrición de las plantas, así como en el fotosistema y activación de algunas enzimas (Mahler, 2003; Prieto-Méndez et al., 2009). Prieto-Méndez et al., (2009) señalan que la absorción del Mn disponible en suelos por parte de las plantas es mayor que para el Zn, seguidos en orden por el Cd, el Cu y Pb. Es importante mencionar que tiene la característica de sustituir a elementos esenciales para las plantas como son el caso de Ca y Mg (Kabata-Pendias, 2000).



Metales como el Zn y el Cu también se consideran micronutrientes debido a que se encuentran de forma natural en los suelos, estos ayudan a que los seres vivos a tener un buen metabolismo, por ejemplo, en el caso del Zn que es un nutriente requerido para el desarrollo de las plantas (Mahler, 2003), como en la norma mexicana que valores adecuados de Zn están a > 1.0 y de Cu a $> 2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pero estos a concentraciones muy altas pueden llegar a considerarse veneno para la salud pública a través de la cadena alimenticia, debido a que las plantas absorben estos metales (Stevens, et al., 2003; Prieto-Méndez et al., 2009).

Las propiedades y variedades de suelos siempre jugaran un papel importante en el comportamiento de los contaminantes en el suelo, algunas investigaciones sugieren que el Cu suele retenerse más en los suelos calcáreos (Rooney et al., 2006; Zhao et al., 2006), lo que significa que son ricos en carbonato de Ca, como observamos en el apartado anterior de los macronutrientes, tenemos altas concentraciones de Ca, en el caso de la mineralogía encontramos anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) para el P1 y P10, mineral que está compuesto por Ca. Es importante mencionar que se observa en la tabla 35 que las concentraciones más altas de Zn y Cu se encuentran en los puntos (P1, P7 y P15) que presentan partículas del tamaño de los limos (siltic), generando así una tendencia en la que las concentraciones más bajas se encuentran en suelos arenosos (arenic).



6.7.3 Metales pesados

En los últimos años, se han incrementado los estudios sobre la contaminación en el suelo relacionados con la concentración de hidrocarburos y metales pesados. Los metales pesados han provocado serios problemas ambientales. Estos metales pueden presentarse de manera natural en el subsuelo y son liberados por procesos pedogenéticos, principalmente, por la alteración de los minerales primarios, la fracción coloidal y la presencia de complejos arcillo-húmico. Así mismo, se encuentran en las rocas y en altas concentraciones de estos metales. Es importante mencionar que, en los últimos años, debido al deficiente manejo de las actividades petroleras, se han incrementado la liberación de estos metales al medio ambiente (Shallari et al., 1998; Baumann et al., 2011; Cavallo y Rimoldi, 2013).

En este sentido, en el siguiente histograma (figura 27) se muestran la concentración de los metales pesados los cuales son Ba, Ni, V, Cr y Pb en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ encontrados en las muestras analizadas. En el cual, podemos observar las concentraciones de $\text{Ba} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Pb}$ en ese orden.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

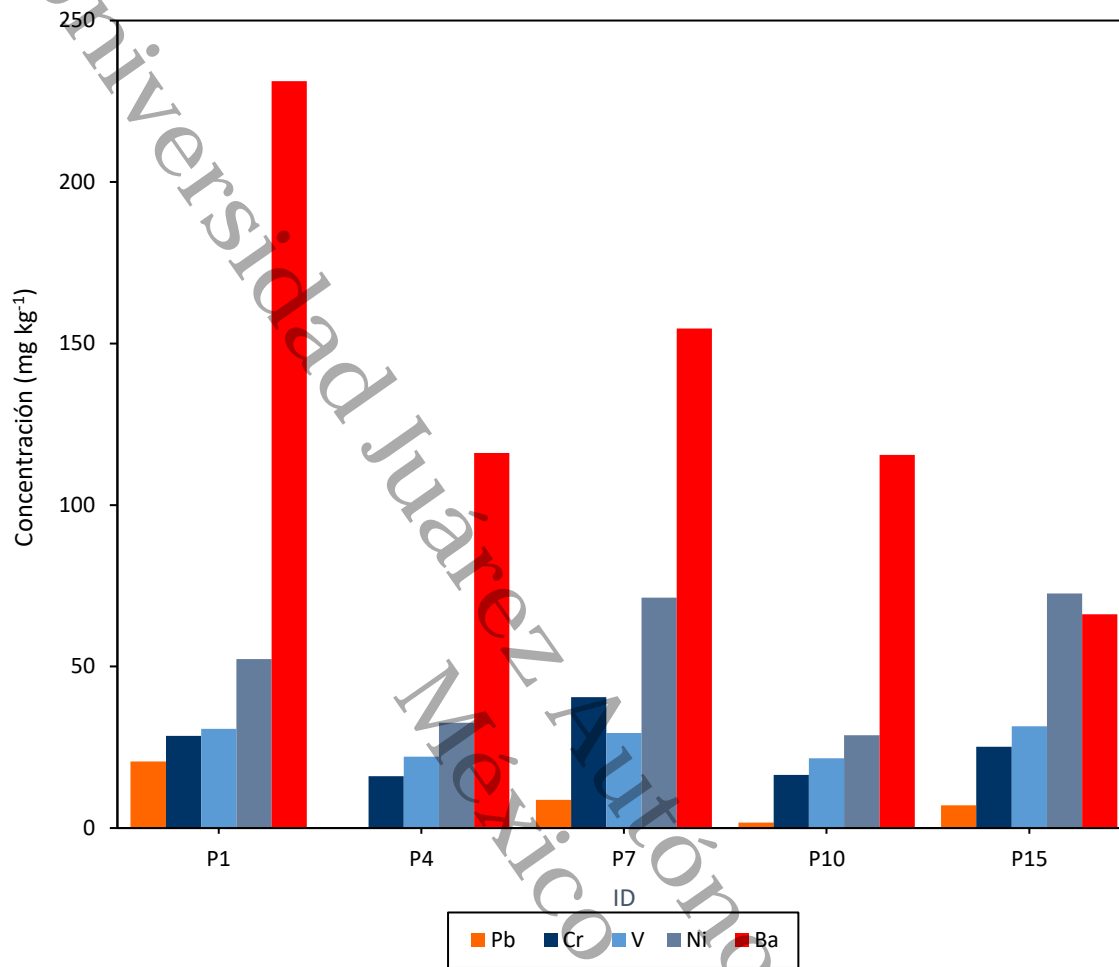


Figura 27. Histograma de las concentraciones de metales pesados (Pb, Cr, V, Ni y Ba) para el P1, P4, P7, P10 y P15.



Así mismo, las concentraciones para nuestros cinco puntos se muestran en la tabla 36, observamos que todas las muestras tienen concentraciones de estos metales, pero solo el P4 no contiene concentración de Pb.

Tabla 36 Concentraciones de metales pesados en $mg \cdot kg^{-1}$.

ID	Pb	Cr	Ni	Ba	V
P1	20.601	28.537	52.283	231.212	30.678
P4	0.000	16.083	32.625	116.125	22.058
P7	8.683	40.521	71.380	154.615	29.460
P10	1.729	16.497	28.703	115.521	21.596
P15	7.020	25.163	72.655	66.196	31.511

Con el fin de evaluar si los datos están por encima del LMP, se compararon los resultados con los valores establecidos por tres normas mexicanas a) NOM-021-SEMARNAT-2000, b) NOM-004-SEMARNAT-2002 y c) NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004; así como los LMP de los reglamentos de otros países como Rusia, Holanda, Alemania, Estados Unidos y Canadá (ver tabla 37).

Tabla 37. Límites máximos permisibles de cinco países. RSL: Regional screening levels, A: Agricultura, R: Residencial, C: Comercial e I: Industrial. HS 2.1.7.2511-09," 2009, State standart 2.1.7.2041-06, (2006), Lijzen et al., (2001), EPA US (2019), CEQG (2019), NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM 147.SSA1-SEMARNAT-2012, NOM-004-SEMARNAT-2002.

Metales	Rusia	Holanda	USA	Canadá				México		
				$mg \cdot kg^{-1}$						
			RSL	A	R	C	I	NOM-021	NOM-147	NOM-004
Pb	65	580		70	140	260	600	100-300	400	840
Cr				64	64	87	87		280	3000
Ni	40	100		45	45	89	89	100	1600	420
Ba		890	1500	750	500	2000	2000			
V	150			130	130	130	130		78	



Tabla 38. Relación de los metales pesados con la textura, mineralogía y pH.

ID	Textura	Pb	Cr	Ni	Ba	V	pH
			<i>mg·kg⁻¹</i>				
P1	Limosa	20.601	28.537	52.283	231.212	30.678	M. Alcalino
P4	Franco arenosa	0.000	16.083	32.625	116.125	22.058	M. Alcalino
P7	Franco limosa	8.683	40.521	71.380	154.615	29.460	M. Alcalino
P10	Franco arenosa	1.729	16.497	28.703	115.521	21.596	Neutro
P15	Franco limosa	7.020	25.163	72.655	66.196	31.511	M. Acido
ID	AS de Ca	Tectosilicato	Sulfato de Al	Filosilicato	Nesosilicato	Silicato	HTP
P1	Anortita		Alunógeno	Caolinita 1:1		Cuarzo	NC
P4		Albita		Illita 2:1		Cuarzo	C
P7		Albita	Alunógeno			Cuarzo	C
P10	Anortita		Alunógeno			Cuarzo	C
P15		Albita	Alunógeno		Almadino	Cuarzo	C

Con respecto al Pb tenemos las mayores concentraciones en el P1, P7 y P15, estos puntos tienen la característica de presentar una textura del grupo de los limos, siendo los de menor concentración estar presentes en las texturas arenosas (tabla 38). El P1 (20.601 mg·kg⁻¹) tiene la mayor concentración de Pb (punto no contaminado por hidrocarburo), es importante mencionar que la bioaccesibilidad del Pb está estrechamente ligada con la composición mineralógica del suelo (Palumbo-Roe et al., 2013), este punto contiene minerales del grupo de los filosilicatos, silicatos, sulfatos de Al, tectosilicatos y aluminosilicatos de Ca.

Se ha reportado que los carbonatos, óxidos de Fe, carbonatos ricos en Al o Mg, silicatos y filosilicatos tienen la facilidad de absorber este metal (Reis et al., 2014), pero Reis et al., 2014 sugieren que la fracción bioaccesible de Pb está asociada principalmente con los carbonatos y en menor medida con los óxidos e hidróxidos de Fe, por lo que la mayor concentración de Pb en este punto se pueda deber principalmente a su composición mineralógica (tabla 38).

Aunque los valores encontrados para Pb no rebasan los LMP de Rusia, Canadá y México, hay autores como Lanphear et al., (2005) y Chiodo et al., (2007) advierten que la bioacumulación del Pb puede causar déficits cognitivos y conductuales principalmente en niños. Además, Kabata-Pendias, (2000) encontraron que algunas



plantas permiten la biomagnificación del Pb, por ejemplo, [López et al., \(2005\)](#) encontró en cebada. Al estar presentes en las muestras analizadas en el sitio de estudio existen derrames continuos de esta fuente, es importante realizar estudios en plantas y en la población, para establecer medidas de prevención o remediación.

Algunos autores mencionan que una de las mayores exposiciones de Pb está en los suelos, por lo que se ha demostrado altos niveles de este metal en la sangre de niños ([Johnson y Bretsch 2002](#)), otros autores concuerdan que existe una buena correlación entre las concentraciones de Pb en el suelo y en los niveles en la sangre ([Morrison et al., 2012](#)). Su presencia en el suelo se debe principalmente a fuentes antropogénicas, se tiene reportado que cuando hay presencia de Pb en suelos, muy probablemente también haya Cd y Zn ([Hettiarchchi y Pierzynski, 2002](#)).

La solubilidad del Cr suele ser baja en suelos cuyo pH está entre moderadamente ácido y moderadamente básico, algo que notamos es que la mayoría de nuestros puntos presentan estos dos tipos de pH, debido a que la mayoría de este metal se precipita como óxidos e hidróxidos. Por otro lado, pueden ser sorbidos en minerales del grupo de las arcillas como en el caso del P1 (caolinita) y P4 (ilita), pueden formar parte de los minerales primarios como el cuarzo presente en todos los puntos, en menor medida, suelen estar asociados con óxidos de Fe, Al y Mn ([Gasser y Dahlgren, 1994](#); [Beccquer et al., 2003](#); [Bradl; 2004](#); [Kabata-Pendias et al., 2011](#); [Kelepertzis y Stathopoulou, 2013](#)).

Estos últimos mencionados son elementos que son constituyentes del suelo como observamos en los análisis de SEM-EDS y que forman parte de minerales como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), alunógeno ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{12} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), ilita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$) que es un filosilicato del tipo 2:1, los cuales tienen mayor capacidad adsorbente en la retención de metales y finalmente, el almadino ($(\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), que pueden ser la fuente principal de estos óxidos para su después precipitación.



Como en el caso del Pb, el Cr no rebasa el límite máximo permisible para las normas mexicanas (tabla 37), pero con respecto a la mineralogía no tenemos la presencia de este mineral, por lo que podemos decir que proviene de fuentes antropogénicas. Debido a esto, es importante mencionar que nuestra concentración más alta se encuentra en el P7 ($40.521 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) estando solo a $24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de rebasar el límite en la normativa canadiense (tabla 37). Cabe destacar, que según la EPA (2007) el Cr (VI) es el tipo de cromo que se considera toxico y puede causar dermatitis alérgica, úlceras, daños en los pulmones e hígado y cáncer de pulmón. Bajo condiciones normales no representa un posible riesgo toxicológico (WHO, 1988).

A diferencia de los metales pesados anteriormente hablados, el níquel (Ni) es el único metal que rebasa el límite máximo permisible en dos países (tabla 36), Rusia y Canadá, para el P1 ($52.283 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P7 ($71.380 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y P15 ($72.655 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Una tendencia que venimos observando como en el caso de los micro y macronutrientes, es que las mayores concentraciones están ligadas principalmente a una textura del grupo de los limos.

Por otro lado, su retención al suelo suele estar asociado con los silicatos, los cuales tenemos presencia en todos los suelos como vimos en la DRX que el cuarzo es el de mayor relevancia, siguiendo de nesosilicatos, aluminosilicatos y filosilicatos (tabla 38), de igual forma, pero con menor influencia con óxidos de Mn y Fe, elementos abundantes en todas las muestras (Alves et al., 2011; Antić-Mladenović et al., 2011; y Rajapaksha et al., 2012). Weng et al., (2003, 2004) menciona que algunas propiedades que influyen la biodisponibilidad del Ni en las plantas incluyen el pH, y el contenido de la materia orgánica, minerales de arcilla (filosilicatos P1) y de óxidos-hidróxidos de Fe.

El bario (Ba) es el metal con mayor concentración de los metales pesados (tabla 38), no encontramos evidencia de la presencia de este elemento en la DRX y en el análisis de SEM-EDS, por lo que podemos decir que su presencia se debe a fuentes antropogénicas, su presencia se puede deber a que los compuestos de Ba suelen



estar asociados a agente densificante para todos los fluidos de perforación, utilizados en la extracción de los hidrocarburos (SLB, 2020).

Las concentraciones más altas se encuentran donde existe una textura de grupo de los limos, P1 (231.212 mg·kg⁻¹) y P7 (154.615 mg·kg⁻¹), solo teniendo la más baja concentración en el P15 (66.196 mg·kg⁻¹) el cual también pertenece a este tipo de textura, siendo no una tendencia, ya que las concentraciones después del P1 y P7 pertenecen a una textura del grupo de las arenas. Aunque su presencia se puede deber a los filosilicatos, carbonatos y óxidos-hidróxidos de Fe presentes en los puntos (tabla 38).

Por último, tenemos al vanadio (V), el cual las concentraciones más altas siguen las tendencias de permanecer a la textura del grupo de los limos, P1 (30.678 mg·kg⁻¹), P7 (29.460 mg·kg⁻¹) y P15 (31.511 mg·kg⁻¹). En algunos suelos el vanadio suele estar asociado con silicatos de magnesio, en unos estudios mencionan que son retenidos en la fracción residual, como la materia orgánica, los minerales de arcillas (filosilicatos P1 y P4) y los óxidos Fe y Mn presentes en todos los puntos (Kabata-Pendias, 2011).



7. Conclusión

Se concluye que derivado del análisis topográfico se definieron los sitios de muestreo, en los cuales, se encontraron dos tipos de suelos: Gleysoles y Fluvisoles, subclasificados como Gleysol-Vertico, Gleysol-Eutrico y Fluvisol-Gleyico. Con respecto al análisis de los parámetros físicos y químicos de los 23 estratos pedogénicos muestran que existen diferencias entre sí, lo que indica cambios entre un sitio y otro, aún con la misma clasificación edafológica, especialmente en parámetros como textura, pH, CE, CIC, CC, densidades y porosidad, lo cual, la literatura define como efectos que pueden medirse en baja producción de cultivos. Lo anterior, resulta trascendente, ya que en la zona de estudio la población práctica el auto consumo de hortalizas y especies animales de corral.

Cabe destacar que, la presencia de hidrocarburos podría ser la responsable de estos cambios, por un lado, la mayoría de los puntos (P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P12, P13, P15, P17, P18, P19, P22 y P23) rebasan el LMP, aunque cabe destacar, que la máxima extracción fue con diclorometano, mientras que con hexano y metanol la concentraciones son bajas, en el caso de hexano para el P5, P6, P7, P8 y P9 se llegan a tener concentraciones nulas con respecto a los otros dos solventes en los que se presentan concentraciones de hidrocarburos, por lo que la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 tendría que ser evaluada ya que establece que el solvente a utilizar es el hexano.

Por otro lado, en el análisis SARA observamos que la mayoría de las fracciones presentes son asfáltenos y aromáticos, los primeros relacionados con la reducción de potencial hídrico (cambios en texturas, capacidad de campo y densidades) y los segundos, con la toxicidad por bioacumulación las muestras P7 (66%) y P20 (62%) son las que presentan mayor porcentaje de aromáticos.

Con respecto a la determinación de metales pesados solo se analizaron cinco muestras de suelo (P1, P4, P7, P10 y P15), se detectaron 13 de 14 metales analizados, siendo el Cd el único no encontrado debido a que estuvo por debajo del límite de detección del equipo de Absorción Atómica por Flama. Se clasificaron



como macronutrientes (K, Ca, Na y Mg), micronutrientes (Cu, Mn, Zn y Fe) y metales pesados (Cr, Ni, Pb, Ba y V).

Con respecto a los macronutrientes se observaron valores altos en este orden $Mg > Ca > K > Na$, siendo Na el de menor concentración, lo que respaldaría a la CE en el que P1, P4, P7 y P10 presenta efectos despreciables de la salinidad y el P15 muy ligeramente salino y en el caso del análisis elemental SEM-EDS, el Na es el elemento con menor concentración en %masa, teniendo en el P15 0.000 %masa.

Por otro lado, en el caso de los micronutrientes observamos concentraciones en ese orden $Fe > Mn > Zn > Cu$, comprándolos con los valores requeridos en el suelo de la NOM-021-SEMARNAT-2000, las concentraciones son exageradamente altas para lo propuesto en la norma. En el mismo sentido, fueron comparados con LMP de otros países en los cuales, para el caso de Mn el P1, P4, P7 y P10 se rebasa el LMP para Estados Unidos, el cual es $180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el caso del Fe, la alta concentración se puede observar en la micromorfología del suelo, ya que su presencia se manifiesta como nódulos o revestimientos en las láminas delgadas, llegando a ser la principal distinción por su característico color pardo rojizo, su importancia radica a que en los estudios ambientales los óxidos de Fe son receptores de metales pesados.

Se encontraron la presencia de cinco metales pesados $Ba > Ni > V > Cr > Pb$ en este orden de concentración. Con respecto a las tres normas mexicanas NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-004-SEMARNAT-2002 y NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 solo se tienen LMP para Pb, Cr, Ni y V, en los cuales no se rebasa el límite para ninguna de estas cuatro. Comparándolas con normas de otros países se encontró que para Ni el P1, P7 y P15 se rebasa el LMP para Rusia y Canadá.

En el mismo sentido, encontramos una tendencia significativa con respecto a la textura con el contenido de metales pesados, micronutrientes y macronutrientes, las mayores concentraciones se encuentran con textura del tipo limosa, mientras que las concentraciones más bajas se encuentran con la textura del tipo arenosa, de



igual forma, la mayor concentración de Fe está asociada a la textura media (limosa), cabe destacar, que los óxidos de Fe están asociados a retener en mayor proporción metales pesados y contaminantes que los filosilicatos. Por otro lado, es importante mencionar que en el análisis de SEM-EDS se encontró la presencia de metales como Mo y Ti.

Con respecto al análisis mineralógico encontramos minerales como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), alunógeno ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{12} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), ilita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$), almadino ($(\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) y cuarzo (SiO_2), los cuales la caolinita e ilita son los de mayor importancia por ser minerales de la arcilla (filosilicatos), los cuales están asociados a la absorción de contaminantes como metales pesados.

Las condiciones geomorfológicas del sitio, las características físicas, químicas y mineralógicas generan las condiciones para que exista una migración y filtración de contaminantes como hidrocarburos y metales pesados en el suelo, aunado a las actividades agropecuarias que se suscitan en la zona de estudio, es recomendable tomar medidas por posibles riesgos a la salud humana.



8. Bibliografía

1. Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497.
2. Adams, R.H., Guzmán Osorio, F.J. & Zavala Cruz, J. (2008). Water repellency in oil contaminated Sandy and clayey soils. *Int. J. Environ. Sci. Tech*, 5 (4), 445-454.
3. Adánez, P., García, A., & Locutura, J. (2009). La geoquímica en los sedimentos de la llanura de inundación del Manzanares como medio para evaluar el impacto ambiental. *Bol. Geol. Min*, 120, 69-80.
4. Aguilera S., S. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121065>
5. Akmaz, S., Iscan, O., Gurkaynak, M. A., & Yasar, M. (2011). The structural characterization of saturate, aromatic, resin, and asphaltene fractions of Batiraman crude oil. *Petroleum Science and Technology*, 29(2), 160-171. <https://doi.org/10.1080/10916460903330361>
6. Alatríste D, A. (2019). *Caso de Estudio: Control de Inundaciones de Tabasco* (tesis de licenciatura). Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.
7. Alejandro, L., Sánchez, P., Vega, P. y Quintanilla, A (2002). Estudio del comportamiento de los sedimentos en el sistema de los ríos Mezcalapa, Samaria, Carrizal, Estado de Tabasco, Primera Etapa. Reporte Interno. Villahermosa, México: CNA, UJAT, 2002.
8. Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3ra ed.). Reading, UK: Springer



9. Almeida, A. L. B., De la Torre Chauvín, E. H., Dranichnikova, D. E., & Perugachi, L. E. M. (2015). Recuperación de níquel, vanadio y molibdeno del catalizador agotado de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). *Revista Politécnica*, 36(2), 59-59.
10. Alonso, F., Ramírez, S., Ancheyta, J., & Mavil, M. (2008). Alternativas para la recuperación de metales a partir de catalizadores gastados del hidrotratamiento de hidrocarburos pesados: un caso de estudio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(2), 55-69.
11. Alves, S., Trancoso, M.A., Gonçalves, M.D.L.S., Correia dos Santos, M.M., (2011). A nickel availability study in serpentines areas of Portugal. *Geoderma* 164 (3–4), 155–163
12. Antić-Mladenović, S., Rinklebe, J., Frohne, T., Stärk, H., Wennrich, R., Tomić, Z., Ličina, V., (2011). Impact of controlled redox conditions on nickel in a serpentine soil. *J. Soils Sediments* 11 (3), 406–415.
13. Arenas-Lago, D., Andrade, M. L., Vega, F. A., & Singh, B. R. (2016). TOF-SIMS and FE-SEM/EDS to verify the heavy metal fractionation in serpentinite quarry soils. *Catena*, 136, 30-43.
14. Alvarado A., Mata R., Chinchilla M. (2014). ARCILLAS IDENTIFICADAS EN SUELOS DE COSTA RICA A NIVEL GENERALIZADO DURANTE EL PERÍODO 1931-2014: II. MINERALOGÍA DE ARCILLAS EN SUELOS CON CARACTERÍSTICAS VÉRTICAS Y OXÍDICO CAOLINÍTICAS. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 107-131.
15. Álvarez-Jiménez, M. F., Chávez, M. D. J. A., Bautista, C. M. M., Olán, C. M., & García, C. E. L. (2019). Evaluación del suelo contaminado con hidrocarburo e intemperizado en Cárdenas, Tabasco. *Journal of Basic Sciences*, 5(15).



16. Asemani, M., & Rabbani, A. R. (2016). Oil-oil correlation by FTIR spectroscopy of asphaltene samples. *Geosciences Journal*, 20(2), 273-283. <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0042-1>
17. Ashoori, S., Jamialahmadi, M., Müller, S. H., Fathi, M., Neshaghi, K. Q., Abedini, A., & Malakkolahi, H. (2012). Determining the particle size of asphaltenes. *Petroleum science and technology*, 30(16), 1639-1646.
18. Barsova, N., Yakimenko, O., Tolpeshta, I., & Motuzova, G. (2019). Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation—A review. *Environmental Pollution*, 249, 200-207.
19. Baumann, F., Maurizot, P., Mangeas, M., Ambrosi, J., Douwes, J., Robineau, B., (2011). Pleural mesothelioma in New Caledonia: associations with environmental risk factors. *Environ. Health Perspect.* 119 (5), 695–700.
20. Becquer, T., Quantin, C., Sicot, M., Boudot, J.P., (2003). Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia. *Sci. Total Environ.* 301 (1–3), 251–261.
21. Beltrán P. O. I. y Vela C. Gilberto. Suelos contaminados con hidrocarburos y su efecto en la formación de agregados del suelo en la Venta, Tabasco. Universidad Autónoma Metropolitana. México. (2009).
22. Besoain, E. 1985. Minerales de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
23. Bissada, K. A., Tan, J., Szymczyk, E., Darnell, M., & Mei, M. (2016). Group-type characterization of crude oil and bitumen. Part I: Enhanced separation and quantification of saturates, aromatics, resins and asphaltenes (SARA). *Organic geochemistry*, 95, 21-28.
24. Bouma, J., & Van Schuylenborgh, J. (1969). On soil genesis in temperate humid climate. VII. The formation of a glossaqualf in a silt-loam terrace deposit. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 17(4), 261-271.



25. Bradl, H.B., 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *J. Colloid Interface Sci.* 277 (1), 1–18.
26. Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). *Handbook for soil thin section description*. Waine Research.
27. Cavallo, A., Rimoldi, B., (2013). Chrysotile asbestos in serpentinite quarries: a case study in Valmalenco, Central Alps, northern Italy. *Environ. Sci. Processes Impacts* 15 (7), 1341–1350.
28. CENAPRED. (2014). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. ISBN: 970-628-903-8, México, D.F.
29. CEQG, 2019. Canadian Environmental Quality Guidelines [WWW Document]. Can. Council. Minist. Environ URL. <http://sts.ccme.ca/en/index.html>.
30. Chiodo, L. M., Covington, C., Sokol, R. J., Hannigan, J. H., Jannise, J., Ager, J., et al. (2007). Blood lead levels and specific attention effects in young children. *Neurotoxicology and Teratology*, doi:10.1016/j.ntt.2007.04.001
31. CONAGUA (2011). Construcción de la sobreelevación y reforzamiento del Bordo Izquierdo del Río Samaria, estado de Tabasco, 1–124.
32. Cruz-Gandarilla, F., Cabañas Moreno, G., & Ortega Avilés, M. (2005). Aplicaciones de la difracción de rayos X a materiales policristalinos. *Sociedad Mexicana de Cristalografía A.C.*, 104.
33. de Viana, M., Plaza, J., & Ruggieri, V. (2003). Relevamiento de la generación y destino final de residuos de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en la Ciudad de Salta. *Andes*, (14), 0.
34. Durán, E. (2017). Arcillas y biocarbonos para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas: ensayo en filtro a escala precomercial.



35. Durán Reina, E. (2017). Arcillas y biocarbones para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas: ensayo en filtro a escala precomercial.
36. EPA. (2007). Reporte de calidad del agua potable. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories EPA 822-R-04-005.
37. EPA US, 2019. United States Environmental Protection Agency [WWW Document]. URL. <https://www.epa.gov/risk/>.
38. Fan, T., Wang, J., & Buckley, J. S. (2002). Evaluating crude oils by SARA analysis. In SPE/DOE improved oil recovery symposium. Society of Petroleum Engineers.
39. FAO (2009). Guía para la descripción de suelos. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
40. FAO (Food and Agriculture Organization), (2019). Propiedades Químicas. Recuperado 20 noviembre, 2019, de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
41. Fei, X., Lou, Z., Christakos, G., Ren, Z., Liu, Q., & Lv, X. (2018). The association between heavy metal soil pollution and stomach cancer: a case study in Hangzhou City, China. *Environmental geochemistry and health*, 40(6), 2481-2490.
42. Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179-187.



43. Fernández Salgado, Y. (2017). Caracterización de las fracciones SARA de crudo provenientes de hidrodesintegración [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional.
44. Filippelli, G. M., & Laidlaw, M. A. S. (2010). The elephant in the playground: Confronting lead-contaminated soils as an important source of lead burdens to urban populations. *Perspectives in Biology and Medicine*, 53, 31–45.
45. Frančišković-Bilinski, S., & Sakan, S. (2021). Geochemistry of water and sediment.
46. Galán, P. (2014). Contaminación petrolera. *Signos Universitarios*, 18(35).
47. Galán, E. (2000): The role of clay minerals in removing and immobilising heavy metals from contaminated soils. In “Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference”, vol. 1, C. Gomes, ed. Funchal, 351-361
48. García de León, Armando (2017): ESTADO DE TABASCO: POBLACIÓN, ESTRUCTURA ECONÓMICA, PETRÓLEO Y OPCIONES DE RECONFIGURACIÓN TERRITORIAL. In: DINÁMICA ECONÓMICA Y PROCESOS DE INNOVACIÓN EN EL DESARROLLO REGIONAL. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, México. ISBN UNAM: 978-607-30-0000-0, AMECIDER: 978-607-96649-7-8
49. García-Lorenzo, M. L., Marimón, J., Navarro-Hervás, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., & Molina-Ruiz, J. (2016). Impact of acid mine drainages on surficial waters of an abandoned mining site. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), 6014-6023.
50. Garmarudi, A. B., Khanmohammadi, M., Fard, H. G., & de la Guardia, M. (2019). Origin based classification of crude oils by infrared spectrometry and chemometrics. *Fuel*, 236, 1093-1099. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.013>



51. Gasser, U. G., & Dahlgren, R. A. (1994). Solid-phase speciation and surface association of metals in serpentinitic soils. *Soil Science*, 158(6), 409-420.
52. González, Y. V., Ramírez, O. E., Rojas, K. R. C., Restrepo, J. P., Ospina, J. H., & Pinto, S. A. O. (2014). Estudio geotécnico de un suelo tropical para determinar su estado de meteorización y su efecto en las propiedades mecánicas. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 3(1), 70-83.
53. Gracia, J., Alejandro, L., Sánchez, P., vega, P. y Quintanilla, A. Sedimentation in a bifurcation, a study case. (2003). 3rd. IAHR Sympotium on River, Coastal an Estuarine Morphodynamics. RCEM, Barcelona, España, 2003, pp. 1068-1078.
54. Gutiérrez C., Ma. del C. y J. Zavala C. (2002). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra* 20: 101-111.
55. Gutiérrez-Castorena, M. D. C. G., & Cruz, J. Z. (2003). MICROMORFOLOGIA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS.
56. Guzmán-Osorio, F. J., Adams, R. H., Domínguez-Rodríguez, V. I., Lobato-García, C. E., Guerrero-Peña, A., Barajas-Hernández, J. R., & Baltierra-Trejo, E. (2019). Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.10.002>
57. Hettiararchchi, G.M. and Pierzynski, G.M. (2002). In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: Influence of plant growth. *Journal Environmental Quality*, 31:564- 573.
58. HS 2.1.7.2511--09 [WWW Document], 2009. Hyg. Stand. 2.1.7.2511-09. Estim. Permis. Conc. Chem. soil. http://www.np-ciz.ru/userfiles/2_1_7_2511-09.pdf.



59. Huertos, E. G., & Baena, A. J. R. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 48-60.
60. INEGI. (s.f.). El Petróleo. 26 de agosto 2019, de Cuéntame INEGI Sitio web: <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/petroleo.asp>
61. Intagri. (09 de agosto de 2018). Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. Obtenido de La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-eldesarrollo-de-los-cultivos>
62. IUSS Working Group WRB, 2015, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106., FAO, Rome
63. Johnson, D., & Bretsch, J. K. (2002). Soil lead and children's blood lead levels in Syracuse, NY, USA. *Environmental Geochemistry and Health*, 24, 375–385.
64. Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413.
65. Kabata-Pendias, A., (2011). Trace Elements in Soils and Plants. fourth ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York.
66. Kabata-Pendias, A., & Szteke, B. (2015). *Trace elements in abiotic and biotic environments* (p. 468). Taylor & Francis.
67. Kharrat, A. M., Zacharia, J., Cherian, V. J., & Anyatonwu, A. (2007). Issues with comparing SARA methodologies. *Energy & Fuels*, 21(6), 3618-3621.



68. Kelepertzis, E., Stathopoulou, E., (2013). Availability of geogenic heavy metals in soils of Thiva town (central Greece). *Environ. Monit. Assess.* 185 (11), 9603–9618.
69. Keller, T., & Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154(3-4), 398-406.
70. Klein, C.; Hurlbut, J. R. (1999). *Manual of mineralogy* (after James D. Dana). New York: John Wiley and Sons, p.681.
71. Lăcătușu, A. R., Paltineanu, C., Domnariu, H., Vrinceanu, A., Marica, D., & Cristea, I. (2021). Risk Assessment of Hydrocarbons' Storing in Different Textured Soils in Small-Scale lysimeters. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(5), 1-12.
72. Lanphear, B. P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D. C., et al. (2005). Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: an international pooled analysis. *Environmental Health Perspectives*,. doi:10.1289/ehp.7688.
73. Leontaritis, K. J., & Mansoori, G. A. (1988). Asphaltene deposition: a survey of field experiences and research approaches. *Journal of petroleum science and engineering*, 1(3), 229-239.
74. Lijzen, J., Baars, A., Otte, P., Rikken, M., Swartjes, F., Verbruggen, E., van Wezel, A., 2001. Technical evaluation of the intervention values for soil/sediment and groundwater. RIVM Rep. 711701, 147.
75. Loaiza JC, Stoops G, Poch RM, Casamitjana M (2015). *Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias*. Medellín, Colombia: Pascual Bravo.
76. López, A. J. (2006). Manual De Edafología. *Media*, 806 (Enero), 1–92. Retrieved from <http://www.emisarios.unican.es/herramientas.htm>



77. López, P., Guzmán, F.A., Santos, E.M., Prieto, F., Román, A.D. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*hordeum sativum jess*) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*, 32: 247-253.
78. Lutens, A., & Salazar, J. C. USDA Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola Servicio de Conservación de Recursos Naturales e Instituto de Calidad de Suelos*, 14-15.
79. MacEwan, D. M., Wilson, M. J., Brindley, G. W., & Brown, G. (1980). Interlayer and intercalation complexes of clay minerals. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, 5, 197-248.
80. Mahler, R.L. 2003. General overview of nutrition for field and container crops. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 2003 June 9-12; Coeur d'Alene, ID; and 2003 July 14-17; Springfield, IL. Proc. RMRS-P-33.
81. Marín-García, D. C., Adams, R. H., & Hernández-Barajas, R. (2016). Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0838-6>
82. Martínez M., V. E., y López S. F. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra*, 19, 9-17. (2001).
83. Martínez Barrios, E. (2020). Estudio de la migración de hidrocarburos en suelos gruesos para la remediación electroquímica [Tesis de maestría]. Tecnológico Nacional de México.
84. Martínez-Assad, C., Canudas-Sandoval, E., Ochoa-Salas, L., Ruiz Abreu, C.E., Rico-Medina, D., Filigrana-Rosique, J.A., GeneyTorruco-Saravia, M.T.



- (2011). Tabasco, más agua que tierra. México: Sociedad Nacional de Estudios Regionales, A.C.
85. Martínez-Chávez, C. G., Morales-Bautista, C. M., & Alor-Chávez, M. D. J. (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(1), 9-16.
86. Mastandrea, C., Chichizola, C., Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H., & Gutiérrez, A. (2005). Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*, 39(1), 27-36.
87. McMurry, J., Mondragón, C. H., & Pozo, V. G. (2008). Química orgánica (Vol. 5). México, DF: Cengage learning
88. Meléndez, L. V., Lache, A., Orrego-Ruiz, J. A., Pachon, Z., & Mejía-Ospino, E. (2012). Prediction of the SARA analysis of Colombian crude oils using ATR–FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 90, 56-60. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.04.016>
89. Meza-Ávila, A., Fonseca-Rodríguez, D., Ruiz-Hernández, E., Pérez-Santodomingo, N., & Rincón-Polo, G. (2016). Effect of the Distribution of Hydrocarbons SARA Over the Properties of Vacuum Residual. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(4), 437-443.
90. Miralles, A. A. (2010). *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (Vol. 46). Editorial CSIC-CSIC Press.
91. Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., & Caudillo-González, M. (2009). Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(3), 564–574.



92. Morales-Bautista, C.M., Adams, R.H., Hernández-Barajas, J.R., Lobato-García, C.E., & Torres-Torres, J.G. (2016). Characterization of fresh and weathered petroleum for potential impacts to soil fertility. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13 (11), 2689-2696.
93. Morrison, D., Lin, Q., Wiehe, S., Liu, G., Rosenman, M., Fuller, T., et al. (2012). Spatial relationships between lead sources and children's blood lead levels in the urban center of Indianapolis (USA). *Environmental Geochemistry and Health*,. doi:10.1007/s10653-012-9474-y.
94. Moskovchenko, D. V., Kurchatova, A. N., Fefilov, N. N., & Yurtaev, A. A. (2017). Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5), 210. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5928-0>
95. Muggler, C.C., C. van Griethuysen, P. Buurman y T. Pape. 1999. Aggregation, organic matter and iron oxide morphology in oxisols from minas gerais, Brazil. *Soil Sci.* 164: 759-770.
96. Neuhauser, E. F., Norton, R. A., Loehr, R. C., & Sillman, D. Y. (1989). Earthworm and soil microarthropod responses to oily waste application. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(2), 275-281.
97. Núñez, C. E. (2008). Extracciones con equipo Soxhlet. *Obtenido el*, 15.
98. Okoro, D., Oviasogie, P. O., & Oviasogie, F. E. (2011). Soil quality assessment 33 months after crude oil spillage and clean-up. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 23(1), 1- 6. <https://doi.org/10.3184/095422911x12963991543492>
99. Ordóñez, A. D. L., & Schroeder, R. H. A. (2014). Influencia de la geomorfología en la dispersión de hidrocarburos en caso de fuga en ductos del bordo derecho del Campo Samaria. *Kuxulkab*, 17(33).



100. Partida-Ruvalcaba, L., de Jesús Velázquez-Alcaraz, T., Acosta-Villegas, B., & Angulo-Gaxiola, C. E. (2006). Extractos vegetales y su efecto en la conductividad eléctrica de dos suelos salinos y de soluciones. *Terra Latinoamericana*, 24(1), 83-89.
101. Palma-López, D. J., & Cisneros, D. J. (1997). Manejo de conservación de suelos en Tabasco. *Fundación Produce Tabasco AC-Colegio de Postgraduados. Villahermosa, Tabasco.*
102. Palumbo-Roe, B., Wragg, J., Cave, M. R., & Wagner, D. (2013). Effect of weathering product assemblages on Pb bioaccessibility in mine waste: Implications for risk management. *Environmental Science and Pollution Research*,. doi:10.1007/s11356-013-1515-2.
103. Peacock S. y D. Rimmer. (2000). The suitability of an iron oxide-rich gypsum by-product as a soil amendment. *J. Environ. Quality* 29(6): 1969-1975.
104. Permien, T., & Lagaly, G. (1994). The rheological and colloidal properties of bentonite dispersions in the presence of organic compounds: I. Flow behaviour of sodium-bentonite in water-alcohol. *Clay Minerals*, 29(5), 751-760.
105. Plante, A. F., Conant, R. T., Stewart, C. E., Paustian, K., & Six, J. (2006). Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1), 287-296.
106. Prieto-Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
107. Rajapaksha, A.U., Vithanage, M., Oze, C., Bandara, W.M.A.T., Weerasooriya, R., (2012). Nickel and manganese release in serpentine soil



- from the Ussangoda ultramafic complex, Sri Lanka. *Geoderma* 189–190, 1–9.
108. Ramos-Hernández, J.G. (2008). Capítulo 1: Introducción. En 11UNAM (Ed.), Programa Hídrico Integral de Tabasco (pp. 1-24). D.F., México: UNAM.
109. Reis, A. P., Patinha, C., Noack, Y., Robert, S., & Dias, A. C. (2013a). Assessing human exposure to aluminium, chromium and vanadium through ground-level dust ingestion in the Bassin Minier de Provence. France: *Environmental Geochemistry and Health*. doi:10.1007/s10653-013- 9564-5.
110. Reis, A. P., Patinha, C., Wragg, J., Dias, A. C., Cave, M., Sousa, A. J., ... & Duarte, A. (2014). Geochemistry, mineralogy, solid-phase fractionation and oral bioaccessibility of lead in urban soils of Lisbon. *Environmental geochemistry and health*, 36(5), 867-881.
111. Reyes-Salas, A. M., Macías-Romo, C., Ortega-Gutiérrez, F., Reyes-Salas, E. O., Flores-Gutiérrez, D., Alba-Aldave, L., Cervantes-de la Cruz, K. E. (2017). Estudio petrográfico, geoquímico y mineralógico de la fulgurita San José de Lourdes, Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(3), 170–181. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.477>
112. Rivera, F., Alejandro, L., Sánchez, P., Vega, P. y Quintanilla, A (2004). Estudio del comportamiento de los sedimentos en el sistema de los rios Mezcalapa, Samaria, Carrizal, Estado de Tabasco, Segunda Etapa. Villahermosa, México: Informe Final de la UJAT para la SCAOP, 2004, 46 pp.
113. Rodríguez-Padilla, Víctor. (2013). Sistema de estimación, certificación y aprobación de reservas de hidrocarburos en México; análisis de desempeño. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 451-460.
114. Rocha Castro E. (2000). Principios básicos de espectroscopia; Editorial UACH, México.



115. Rojas Caballero, D. R., & Paredes Ángeles, J. (2013). *COMPENDIO DE GEOLOGIA GENERAL* (1ra. Ed.). Lima, Perú: MACRO.
116. Rodríguez-Padilla, Víctor. (2013). Sistema de estimación, certificación y aprobación de reservas de hidrocarburos en México; análisis de desempeño. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 451-460.
117. Rooney, C.P., Zhao, F.J. and McGrath, S.P. 2006. Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25: 726- 732.
118. Rubio, M. P. (2018). Secuestro mineral de contaminantes. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26(3), 324-324.
119. Sánchez, A. J., Salcedo, M. Á., Florido, R., Mendoza, J. D. D., Ruiz-Carrera, V., & Álvarez-Pliego, N. (2015). Ciclos de inundación y conservación de servicios ambientales en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *ContactoS*, 97(97), 5–14.
120. Sánchez, J.L., Franco, V., Gracia, J. y Fuentes, O.A. (2001) Terminación del modelo físico del río Mezcalapa en la bifurcación del río Carrizal-Samaria en el estado de Tabasco. México, D.F.: Informe del Instituto de Ingeniería para la CNA, 43 pp.
121. SEMARNAT. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*
122. SEMARNAT. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. *Diario oficial de la Federación*.
123. SEMARNAT. (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1 (2004). Que establece criterios para determinar las concentraciones de



remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación.

124. Semenkov, I., & Koroleva, T. (2020). Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards. *Geoderma Regional*, 21, e00283.
125. Servicio Geológico Mexicano (SGM), (2017, 22 marzo). Petrografía. Recuperado 14 noviembre, 2019, de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Petrografia.html>
126. Servicio Geológico Mexicano, (SGM) (2017b, 22 marzo). Mineralogía. Recuperado 14 octubre, 2019, de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Mineralogia.html>
127. Shallari, S., Schwartz, C., Hasko, A., Morel, J.L., (1998). Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania. *Sci. Total Environ.* 209 (2–3), 133–142.
128. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2008). Principios de análisis instrumental.
129. SLB. Oilfield Glosary. (2020). Recuperado 25 de septiembre de 2020, de SLB website: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/barite.aspx>
130. Speight, J. G. (1999). The chemistry and technology of petroleum. CRC press.
131. State standart 2.1.7.2041-06 [WWW Document], 2006. Maximum Permis. Conc. Chem. Soil. URL. <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850511.htm>.



132. Stevens, D.P., McLaughlin, M.J., Heinrich, T., 2003. Determining toxicity of lead and zinc run off in soils: salinity effects on metal partitioning and on phytotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry* 22: 3017-3024.
133. Stoops, G., & Eswaran, H. (1985). Micromorphology in wetland soils. *Wetland soil, characterization, classification and utilization. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines.*
134. Taboada, M.A.; Álvarez, C.R. (2008). Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
135. Takawira, A., Gwenzi, W., & Nyamugafata, P. (2014). Does hydrocarbon contamination induce water repellency and changes in hydraulic properties in inherently wettable tropical sandy soils. *Geoderma*, 235, 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.023>
136. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Tasa, D. (2005). *Earth: an introduction to physical geology*. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.
137. Trejo, F. R., Rodríguez, J. M. V., Palacios, J. D. D. M., Botello, M. E., & Cortés, G. S. (2008). Alteración que presenta la distribución de sedimentos en una bifurcación de un río de planicie debido a cambios morfológicos inducidos. Estudio de campo. *Tecnología y ciencias del agua*, 23(3), 49-63.
138. TRUJILLO-NARCÍA, A., RIVERA-CRUZ, M. D. C., LAGUNES-ESPINOZA, L. D. C., PALMA-LÓPEZ, D. J., SOTO-SÁNCHEZ, S., & RAMÍREZ-VALVERDE, G. (2012). Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(4), 360-374.
139. USDA (United States Department of Agriculture). (s.f.). Soil Texture Calculator | NRCS Soils. Recuperado 21 noviembre, 2019, de https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p_2_054167



140. Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(1), 151 - 167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
141. Vodyanitskii, Y.N., 2013. Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review). *Eurasian Soil Sci.* <https://doi.org/10.1134/S1064229313050153>.
142. Wang, H., Chen, R., Sheng, Y., Jiang, W., Zhang, R., Chen, X., ... & Mao, Z. (2021). Impact of Three Soil Textures on the Fungal Community Structure in Rhizosphere Soils of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. *HortScience*, 1(aop), 1-8.
143. Weng, L.P., Lexmond, T.M., Wolthoorn, A., Temminghoff, E.J.M. and Van Riemsdijk, W.H., (2003). Phytotoxicity and bioavailability of nickel: chemical speciation and bioaccumulation. *Environmental Toxicology and Chemistry* 22: 2180- 2187.
144. Weng, L.P., Wolthoorn, A., Lexmond, T.M., Temminghoff, E.J.M. and Van Riemsdijk, W.H., (2004). Understanding the effects of soil characteristics on phytotoxicity and bioavailability of nickel using speciation models. *Environmental Science and Technology* 38, 156-162.
145. White. M. (2013). *Geochemistry* (Ed. rev.). New Jersey, USA: Wiley-Blackwell.
146. WHO. (1988). Chromium. *Environmental Health Criteria* 61.
147. Wyszowski, M., & Sivitskaya, V. (2012). Changes in the content of organic carbon and available forms of macronutrients in soil under the influence of soil contamination with fuel oil and application of different substances. *Journal of Elementology*, 17(1).



148. Yan, Y.W. 2011. Effects of microorganism's population, enzyme activity on tobacco quality of differently textured soil. Hunan Agricultural University, Hunan, Master's Thesis (in Chinese).
149. Zavala C., J. 1993. Evaluación de los cambios de uso del suelo como un proceso de degradación en el campo petrolero Samaria, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. De México. México.
150. Zavala-Cruz, Joel; Gavi-Reyes, Francisco; Adams-Schroeder, Randy Howard; Ferrera-Cerrato, Ronald; Palma-López, David J.; Vaquera-Huerta, Humberto; Domínguez-Ezquivel, J.M. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 23, 293-302.
151. Zavala-Cruz, J., Ramírez, R. J., Palma-lópez, D. J., Zúñiga, F. B., & Reyes, F. G. (2016). PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS: BASE PARA EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS EN TABASCO, MÉXICO. *Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 161–171.
152. Zhao, F.J., Rooney, C.P., Zhang, H., McGratht, S.P., 2006. Comparison of soil solution speciation and diffusive gradients in thin-films measurement as an indicator of copper bioavailability to plants. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25: 733- 742.
153. Zhang, M., A.K. Alva, Y.C. Li y D.V. Calvert. 1997. Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under citrus production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(3): 794-801.
154. Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Liu, C., Sun, C., Zhang, W., & Marhaba, T. (2018). pH effect on heavy metal release from a polluted sediment. *Journal of Chemistry*, 2018.



9. Anexos

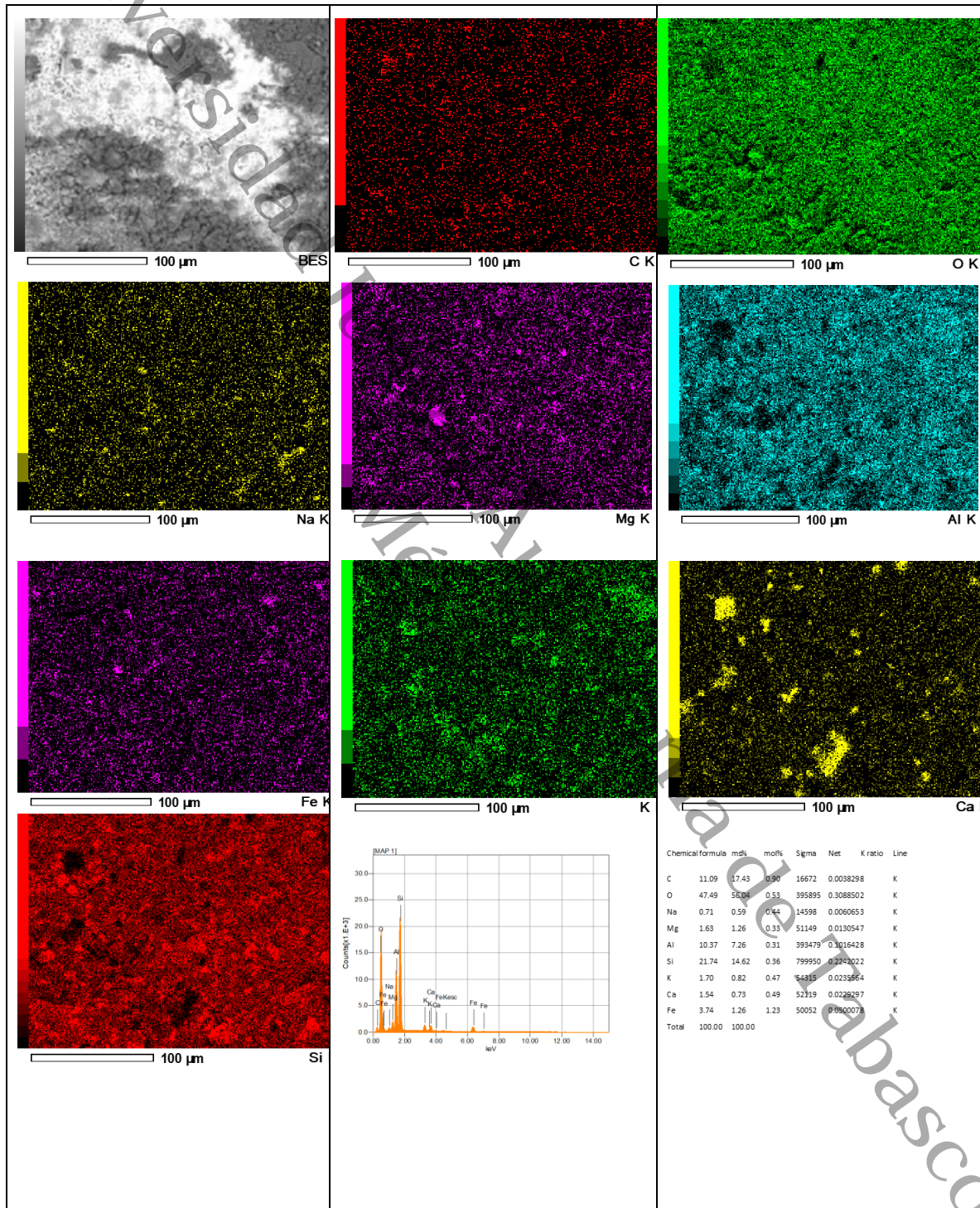


Figura 28. Mapeos SEM-EDS del P1.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

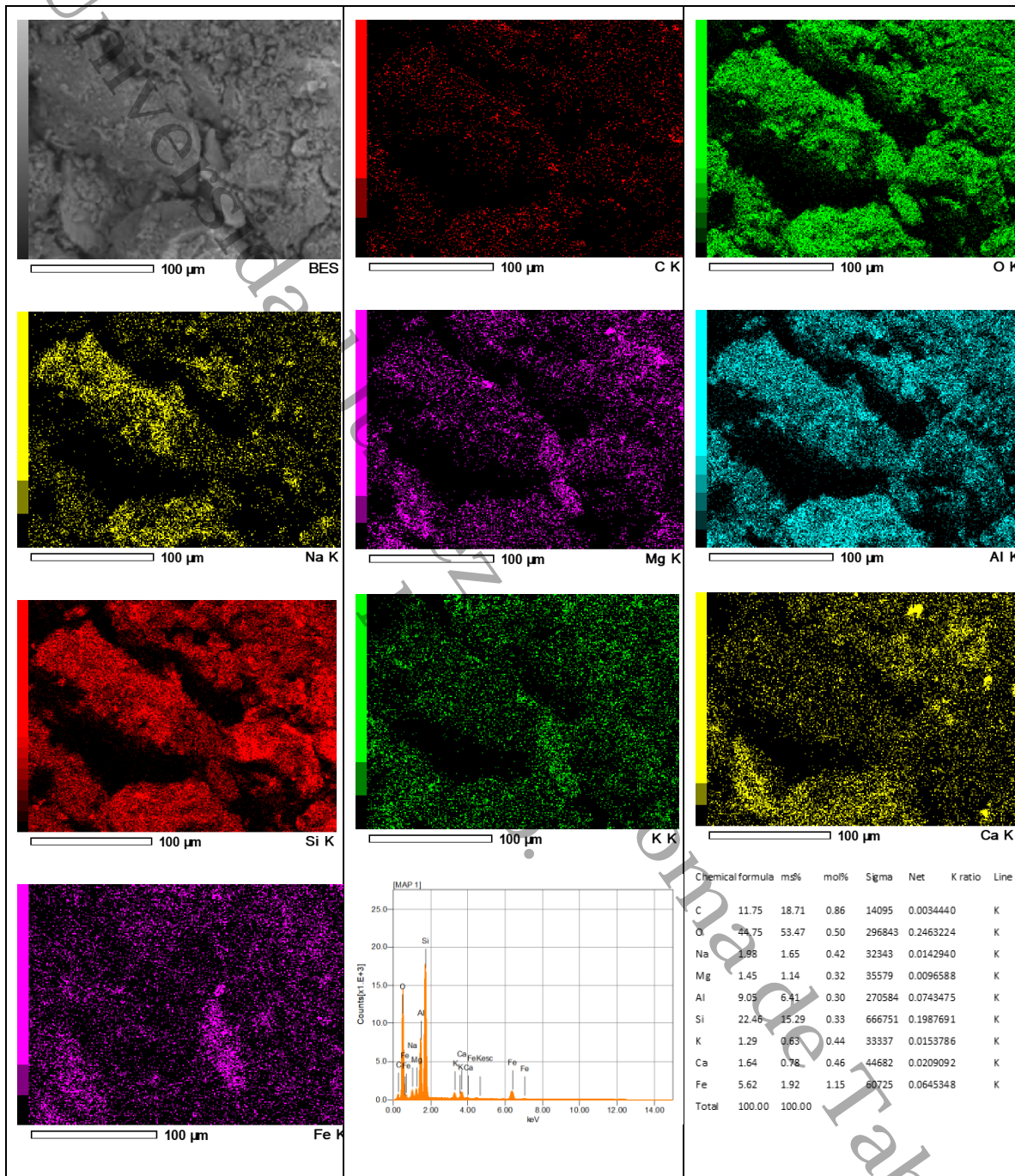


Figura 29. Mapeos SEM-EDS del P4.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

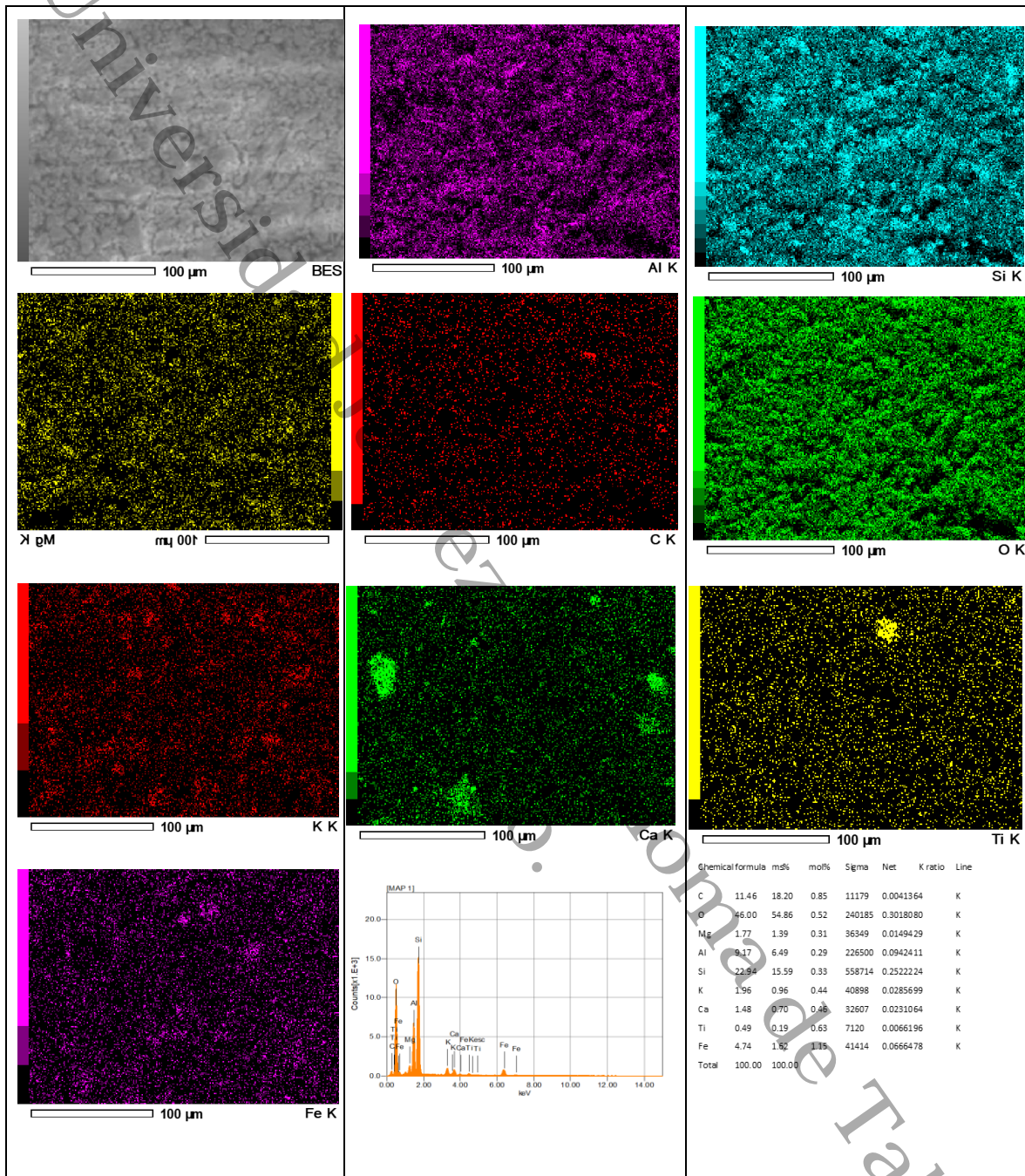


Figura 30. Mapeos SEM-EDS del P7.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

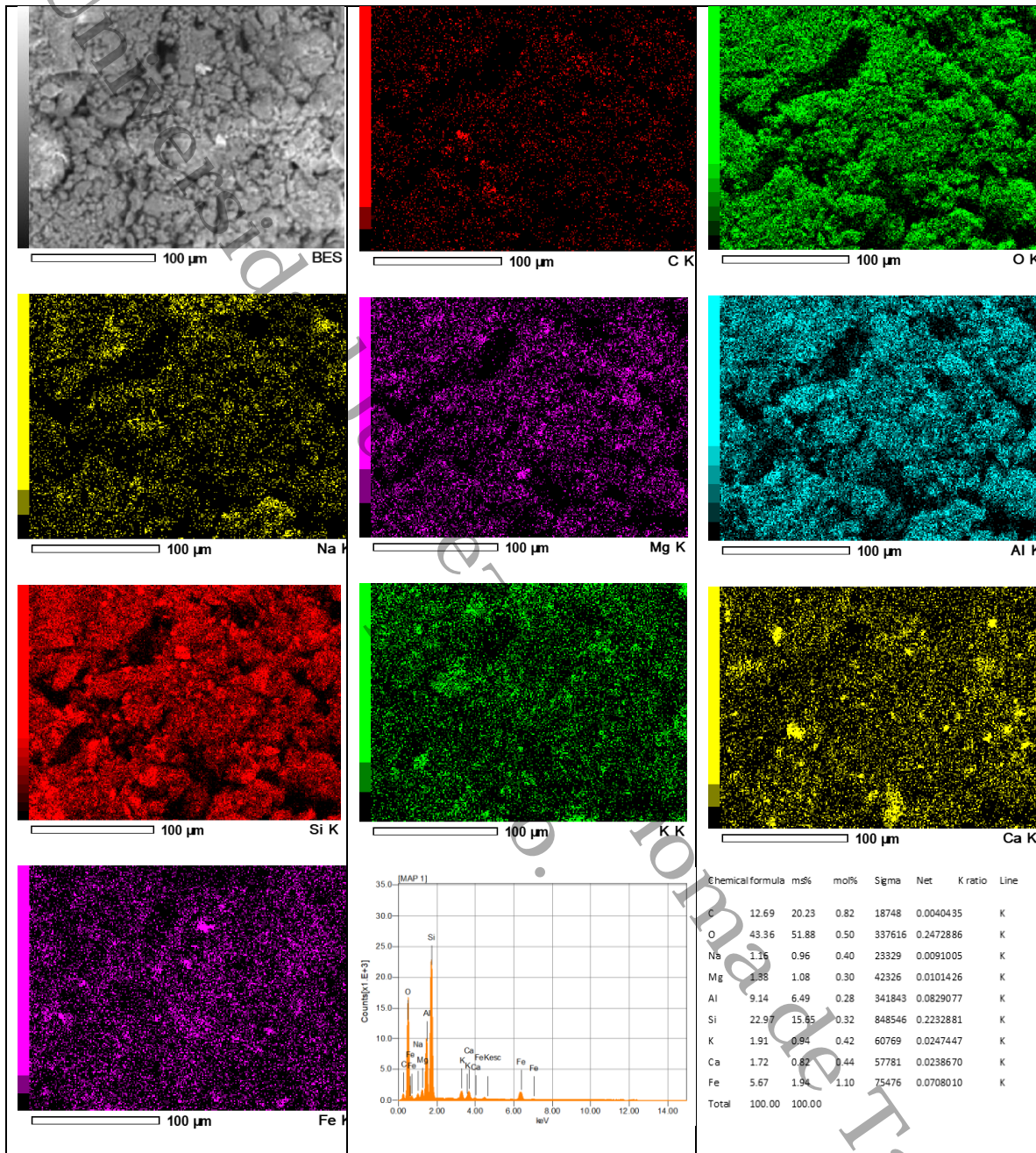


Figura 31. Mapeos SEM-EDS del P10.



EVALUACIÓN GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN UNA ZONA ALEDAÑA AL BORDO SAMARIA EN CUNDUACÁN, TABASCO.

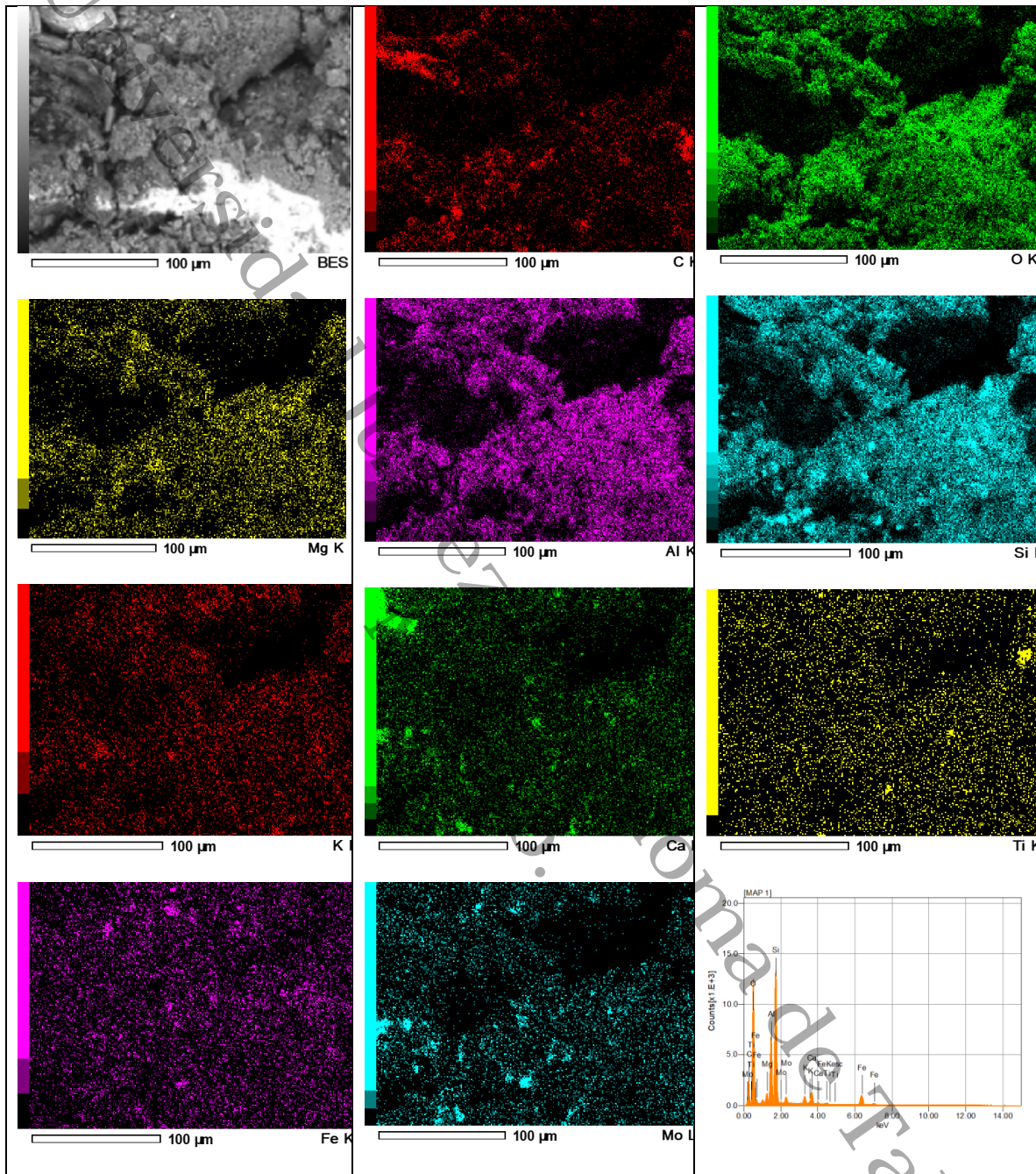


Figura 32. Mapeos SEM-EDS del P15.



Se observan en la tabla 39 las concentraciones y absorbancias que se obtuvieron a partir del estándar certificado de 1000 mg·L⁻¹ Marca Accu/Standard/AccuTrace de Mg, Na, Zn, K, Mn, Ca, Cr, Pb, Cu, Ni, Fe, Ba y V; posteriormente se realizaron las curvas de calibración teniendo coeficientes de correlación mayores a 0.99 (Figura 33)

Tabla 39. Concentraciones y absorbancias para los metales detectados.

Mg		Na		Zn		K	
PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS
0.1	0.1347	0.4	0.3447	0.25	0.0824	0.3	0.1799
0.2	0.2632	0.6	0.4721	0.5	0.1727	0.6	0.3339
0.4	0.5429	0.8	0.5854	0.75	0.244	0.9	0.4973
0.5	0.671	1	0.7083	1	0.3269	1.2	0.6322
0.6	0.8151	1.2	0.8006	1.25	0.3974	1.5	0.7806
Mn		Ca		Cr		Pb	
PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS
0.5	0.0813	1.0	0.2151	0.5	0.036	0.5	0.0149
1	0.1729	1.6	0.3564	1.0	0.0683	1.0	0.0307
1.5	0.2617	2.4	0.5281	1.5	0.1016	1.5	0.0481
2	0.3491	3.2	0.7103	2.0	0.1315	2.0	0.0644
2.5	0.4485	4.0	0.8896	2.5	0.1599	2.5	0.0823
V		Ni		Fe		Ba	
PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS	PPM	ABS
2.0	0.01700	0.3	0.02018	1.0	0.0684	1.0	0.0118
2.5	0.0212	0.6	0.0394	2.0	0.1533	2.0	0.0223
3.0	0.0245	0.9	0.0615	3.0	0.2311	3.0	0.0339
3.5	0.0287	1.2	0.0825	4.0	0.3172	4.0	0.0434
4.0	0.0310	1.5	0.1027	5.0	0.3987	5.0	0.0535
Cu							
PPM	ABS						
0.2	0.0226						
0.4	0.0518						
0.6	0.0766						
0.8	0.0932						

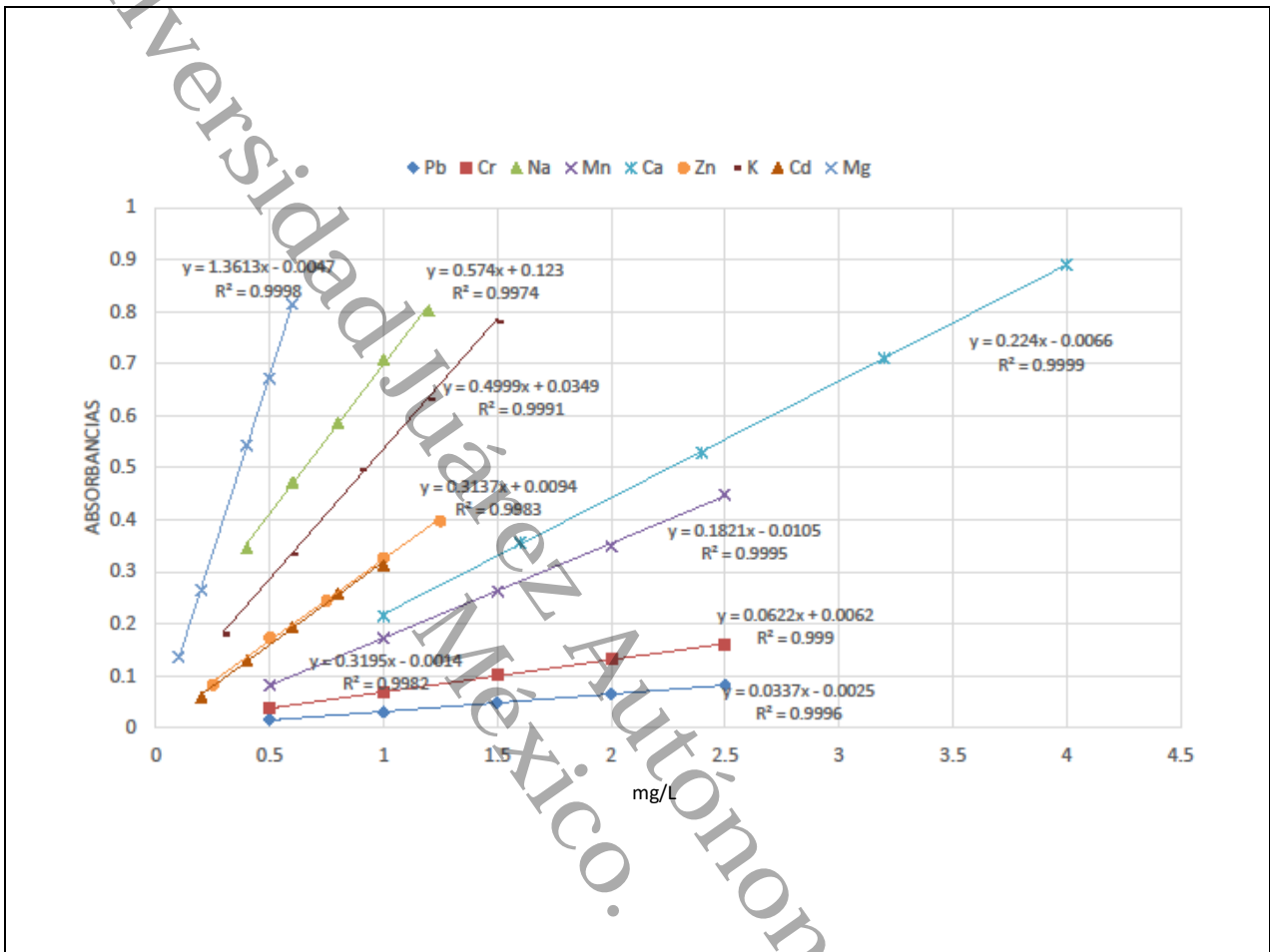


Figura 33. Curvas de calibración para Pb, Cr, Na, Mn, Ca, Zn, K, Cd y Mg

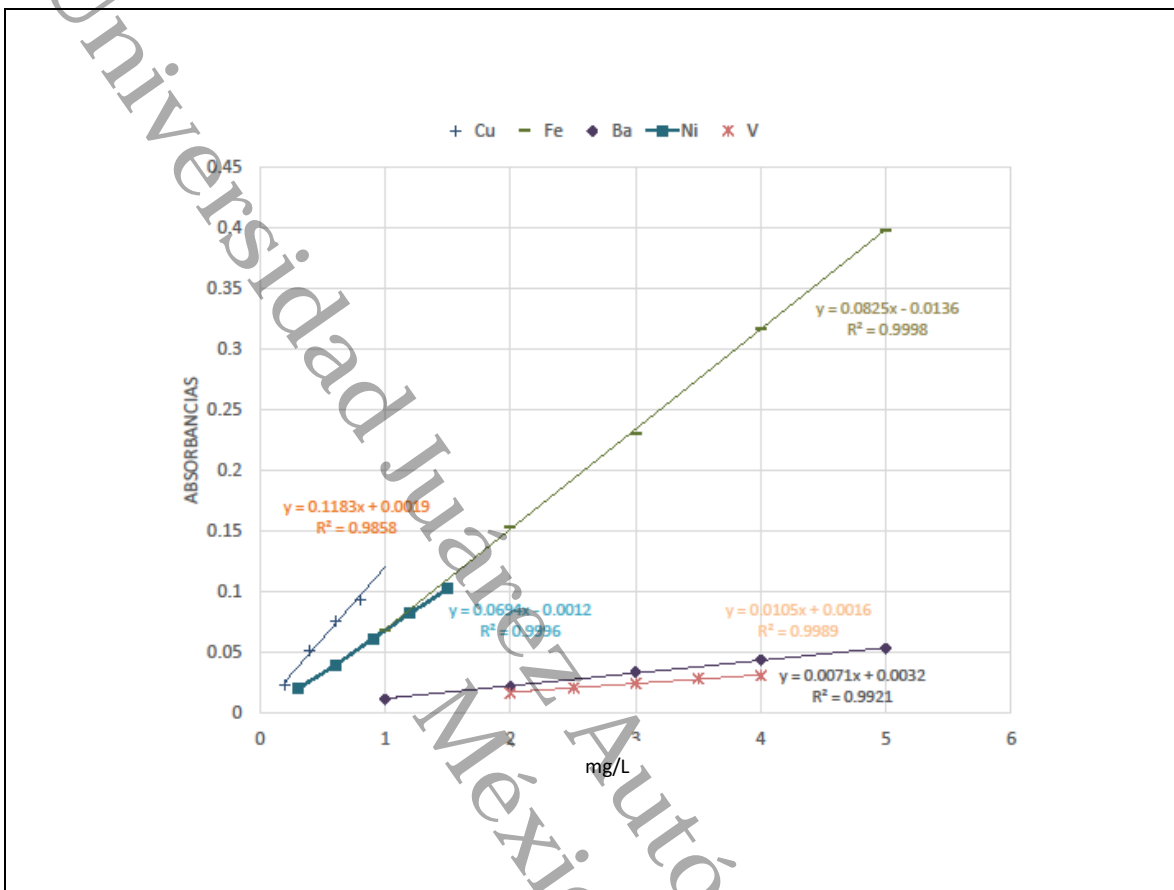


Figura 34. Curvas de calibración para Cu, Fe, Ba, Ni y V