



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BÁSICAS



**“ESTUDIO DE FERTILIDAD Y ELEMENTOS QUÍMICOS EN
SUELOS DE USO AGRÍCOLA CON DIFERENTES
TRATAMIENTOS EN DOS ZONAS EN TABASCO”.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN QUÍMICA APLICADA

PRESENTA

ING. BETEL DEL CARMEN RAMOS GONZÁLEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. MARÍA ANTONIA LUNAGÓMEZ ROCHA

EN CODIRECCIÓN:

M.C. GUILLERMO CHÁVEZ HERNÁNDEZ

CUNDUACÁN, TABASCO, A MARZO DE 2025.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, Tabasco, en el mes de marzo del año 2025, el que suscribe Betel del Carmen Ramos González alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Química Aplicada con número de matrícula 222A27005, adscrito a la División Académica de Ciencias Básicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Química Aplicada y titulada "ESTUDIO DE FERTILIDAD Y ELEMENTOS QUÍMICOS EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA CON DIFERENTES TRATAMIENTOS EN DOS ZONAS EN TABASCO" dirigida por la Dra. María Antonia Lunagómez Rocha y el M.C. Guillermo Chávez Hernández.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.



Betel del Carmen Ramos González

DIRECCIÓN

24 de marzo de 2025

ING. BETEL DEL CARMEN RAMOS GONZÁLEZ
EGRESADA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
QUÍMICA APLICADA
PRESENTE

Por medio del presente y de la manera más atenta, me dirijo a Usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado **"ESTUDIO DE FERTILIDAD Y ELEMENTOS QUÍMICOS EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA CON DIFERENTES TRATAMIENTOS EN DOS ZONAS EN TABASCO"** dirigido por la Dra. María Antonia Lunagómez Rocha en codirección del M.C. Guillermo Chávez Hernández bajo la modalidad de titulación por Tesis. La comisión de revisión conformada por la Dra. María Antonia Lunagómez Rocha, Dr. Carlos Mario Morales Bautista, Dr. Adrián Cordero García, Dr. José Guadalupe Pacheco Sosa y una Servidora aprobó el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** y obtener el grado de *Maestro en Ciencias en Química Aplicada*.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE



DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE ESTUDIOS DE MUJERES

C.C.P.- Archivo.

Dir: Dra. HPV/JP Dra. EAM/ka** J

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


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Carta de Cesión de Derechos

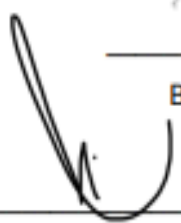
Cunduacán, Tabasco, marzo 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORA en la producción, creación y realización de la Tesis denominada ESTUDIO DE FERTILIDAD Y ELEMENTOS QUÍMICOS EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA CON DIFERENTES TRATAMIENTOS EN DOS ZONAS EN TABASCO. Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.


COLABORADORES



Betel del Carmen Ramos González
Egresada




Dra. María Antonia Lunagómez Rocha
Directora de Tesis



M.C. Guillermo Chávez Hernández
Codirector de Tesis

TESTIGOS





DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar a este punto y haberme dado salud para culminar mis objetivos

A mi compañero de vida y esposo. Resultado de tu apoyo, paciencia, comprensión y amor que me has brindado a lo largo de este trayecto y formación académica. Gracias por ser el ejemplo y fortaleza en mi vida

A mis padres por poner en mí su confianza de ver este sueño cumplir, por su apoyo presente en cada momento. Por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad

A mi hermana por su apoyo emocional en todo momento e impulsar a cumplir mis objetivos

A mi abuelito por su cariño y guía durante toda mi vida

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a mi asesora de tesis, la Dra. María Antonia Lunagómez por su guía y dedicación docente que han sido fundamentales en la dirección y enriquecimiento de esta investigación

Mi gratitud y profundo reconocimiento por sus constructivos comentarios y asesoría durante y después de la realización de estancia académica en la UNAM al Dr. Ciro Eliseo Márquez Herrera en la Facultad de Química en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica en el Laboratorio de Análisis Químicos

Agradecimiento al Dr. Carlo Morales Bautista por su asesoría durante la investigación y permitir realizar la experimentación y pruebas en el laboratorio de suelos e Hidrocarburos de la División Académica de Ciencias Básicas de la UJAT

Agradecimiento profundo al Mtro. Guillermo por su asesoría y orientación en los mapeos requeridos durante la investigación

Gracias a las maestras y compañeros alumnos por su colaboración durante el muestreo y entrevistas realizadas a los productores agrícolas de la zona

A toda la comunidad de profesores e investigadores de la División Académica de Ciencias Básicas

Gracias al Dr. Enmanuel Hernández Núñez por su colaboración a través de los FTIR realizados en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) de la unidad Mérida

Finalmente, mis agradecimientos al CONAHCYT por su apoyo económico por medio de una beca, facilitando así mi camino académico

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.*

Contenido

CAPÍTULO I	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
1.3 Pregunta de investigación	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Justificación.....	3
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	6
2.1 Antecedentes de área de estudio	6
2.2 Contaminación en suelos por vertederos.....	8
2.3 Contaminación en suelos por metales pesados.....	8
2.3.1 Antecedentes regional	8
2.3.2 Antecedentes nacional	9
2.3.3 Antecedentes internacional	10
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	13
3.1 Suelos	13
3.1.1 Fases que componen el sistema suelo.....	13
3.2 Propiedades macromorfológicas del suelo	13
3.2.1 Estructura.....	13
3.2.2 Color	13
3.2.3 Perfil edafológico	14
3.3 Propiedades físicas del suelo	14
3.3.1. Textura	14
3.3.2 Densidad y porosidad	15
3.3.3 Materia orgánica	15
3.4 Propiedades químicas del suelo	15
3.4.1 Intercambio iónico	15
3.4.2 Capacidad de campo (CC).....	16
3.4.3 Potencial de hidrógeno (pH)	16
3.4.4 Conductividad eléctrica (CE)	16
3.5 Calidad del suelo	16
3.5.2 Tipos de contaminación del suelo.....	17
3.5.3 Estándares de calidad ambiental.....	18

3.6. Fuentes contaminantes	21
3.6.1 Agroquímicos	21
3.6.2 Metales pesados.....	21
3.6.3 Origen de los metales pesados.....	23
3.7 Técnicas de separación y extractivas de muestras en laboratorio	23
3.7.1 Extracción continua del método Soxhlet.....	24
3.7.2 Extracto PECT (proceso de extracción de contaminantes tóxicos).....	24
3.8 Espectroscopía.....	24
3.9 Espectroscopía por absorción molecular en las regiones ultravioleta y visible	24
3.10 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)	25
3.11 Espectrometría atómica.....	27
3.11.1 Fundamento teórico de Emisión Atómica.....	28
3.11.2 Calibración de métodos instrumentales.....	28
3.12 Espectroscopia de Emisión atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)	29
3.12.1 Fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo	30
3.12.2 Sistema de introducción de la muestra.....	31
3.12.3 Interferencias en técnicas de espectrometría de plasma	32
3.13 Validación de métodos analíticos	33
3.13.1 Selectividad	33
3.13.2 Linealidad	33
3.13.3 Sensibilidad	34
3.13.4 Exactitud	34
3.13.5 Precisión	34
3.13.6 Robustez.....	34
3.13.7 Repetibilidad.....	35
3.13.8 Intervalo dinámico	35
CAPÍTULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	36
4.1. Ubicación del área de estudio	36
4.2 Metodología	36
4.2.1 Elaboración de cartografía base y caracterización de la zona de estudio	37
Edafología y uso de suelo.....	37
4.2.2 Plan de muestreo y toma de muestra	38
4.2.3 Determinación de fertilidad del suelo	41

4.2.4 Evaluación de contaminantes tóxicos y lixiviación en muestras de suelo del tiradero de residuos sólidos urbanos	42
4.2.5 Cuantificación de metales por medio de Espectroscopía con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)	43
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1 Mapeos de las zonas de estudio	46
5.2 Clasificación de los suelos	48
5.3 Resultados de la caracterización de la fertilidad edáfica de los suelos	55
5.4 Hidrocarburos.....	90
5.4.1 Resultados de HTP y fracción SARA.....	90
5.4.2 Análisis por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	94
5.4.3 Lixiviados en extracto proceso de extracción de contaminantes tóxicos (PECT)	95
5.5 Cuantificación de metales pesados por ICP-OES.....	95
5.5.1 Validación de los resultados.....	95
5.5.2 Análisis y discusión de los resultados de los análisis por ICP-OES	99
VI. CONCLUSIONES	106
VII. REFERENCIAS	108
VIII. ANEXOS	121

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo.....	14
Tabla 2. Normas mexicanas de calidad y evaluación ambiental.	18
Tabla 3. Normas internacionales de calidad y evaluación ambiental.	19
Tabla 4. Normas nacionales e internacionales y sus límites máximos permisibles en suelos.	20
Tabla 5. Materiales y sustancias químicas que se utilizaron durante la toma de muestras.	38
Tabla 6. Coordenadas de puntos de muestreos y perfiles edáficos.	40
Tabla 7. Solventes selectivos utilizados para la extracción de las fracciones SARA.....	42
Tabla 8. Programa de digestión propuesto por el manual de aplicaciones del horno de microondas.	44
Tabla 9. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 1 (uso de suelo agrícola tratado con productos químicos).	56
Tabla 10. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 2 (uso de suelo agrícola tratado con productos orgánicos).	57
Tabla 11. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 3 (TRSU).....	58
Tabla 12. CIC de las muestras recolectas de los polígonos P1, P2, y P3.	83
Tabla 13. CIC de las muestras recolectas del polígono P2.....	84
Tabla 14. CIC de las muestras recolectas del polígono P3.....	85
Tabla 15. Concentraciones de HTP y fracciones SARA para cada muestra del tiradero de RSU con el solvente.	91
Tabla 16. Resultados de repelencia al agua del suelo (tiempo de penetración de una gota de agua) determinada por el método WDPT.	93
Tabla 17. Datos de las curvas de calibración para los elementos normados con límites máximos permisibles obtenidos en el ICP-OES.....	96
Tabla 18. Límites de detección, de cuantificación y valores de desviación estándar obtenidos para ICP-OES.....	97
Tabla 19. Porcentajes de recuperación en el material de referencia "suelo Montana I" para cada metal analizado.....	98
Tabla 20. Lectura de la concentración del estándar de 0.5 ppm para evaluar la repetibilidad.	99
Tabla 21. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P1.	100
Tabla 22. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P2.	101
Tabla 23. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P3.	102

Índice de Figuras

Figura 1. Técnicas de separación y extracción.	23
Figura 2. Interferómetro de Michelson iluminado por una fuente monocromática. Tomada.	27
Figura 3. Diagrama de modelo atómico de Bohr.....	28
Figura 4. Fuente de plasma acoplada inductivamente.....	30
Figura 5. Sistema compuesto para el proceso de introducción de muestra.....	31
Figura 6. Procesos que toma lugar cuando una muestra es introducida a un ICP.	32
Figura 7. Mapa de localización de las áreas de estudio con diferente tratamiento de suelo.	36
Figura 8. Metodología de investigación.	37
Figura 9. Mapa de distribución de puntos de muestreo.....	39
Figura 10. Edafología para el municipio de Cunduacán.	46
Figura 11. Uso de suelo para el municipio de Cunduacán.	47
Figura 12. Mapa de elevación topográfica para los sitios de estudio.	48
Figura 13. Perfiles edafológicos del Polígono 1 (Tratamiento de suelo con productos agroquímicos).	50
Figura 14. Perfiles edafológicos del Polígono 2 (Tratamiento de suelos con productos orgánicos).	52
Figura 15. Perfiles edafológicos del Polígono 3 (Tiradero de Residuos Sólidos Urbanos). ..	53
Figura 16. Perfil topográfico correspondiente a la trayectoria de muestreo de P1, P2 y P3. Diseño propio.	53
Figura 17. Perfiles de suelos más representativos de los tres polígonos de estudio P1, P2 y P3.....	54
Figura 18. Resultado de pH de los polígonos P1, P2 y P3.....	60
Figura 19. Resultado de capacidad de campo (CC) de los polígonos P1, P2 y P3.	64
Figura 20. Resultado de conductividad eléctrica (CE) de los polígonos P1, P2 y P3.	67
Figura 21. Resultado de densidad aparente (DA) de los polígonos P1, P2 y P3.	70
Figura 22. Resultado de densidad real (DR) de los polígonos P1, P2 y P3.	72
Figura 23. Resultado de porosidad (PO) de los polígonos P1, P2 y P3.....	74
Figura 24. Resultado de materia orgánica (MO) de los polígonos P1, P2 y P3.....	76
Figura 25. Resultado de porcentaje de limos + arcillas de los polígonos P1, P2 y P3.	79
Figura 26. Resultado de porcentaje de arenas de los polígonos P1, P2 y P3.	80
Figura 27. Clasificación textural de P1 (MAGH1, MAGH2), P2 (MOH1, MOH2) y P3 (MBH1, MBH2). B) polígonos P1 y P2.....	82
Figura 28. Disponibilidad de nutrientes con respecto al pH en los suelos del polígono P1.	88
Figura 29. Disponibilidad de nutrientes con respecto al pH en los suelos del polígono P2.	89
Figura 30. FTIR de extractos de HTP con solvente diclorometano del sitio P3 (muestras del Tiradero de RSU).....	94

RESUMEN

La agricultura es la fuente de economía principal en el estado de Tabasco, en la actualidad se ha presentado baja productividad de cultivo debido a diversas limitantes. El objetivo fue realizar un estudio de fertilidad, contaminación de hidrocarburos y elementos químicos en suelos de uso agrícola. Las muestras se tomaron considerando: un primer polígono tratado con productos inorgánicos (P1), un segundo con orgánicos (P2), y un tercer polígono (P3) en un tiradero de residuos sólidos urbanos (TRSU), por tratarse de una posible fuente de contaminación. La metodología utilizada para la determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los HTP solo se determinaron en el P3 y las fracciones SARA se obtuvieron mediante el método de Martínez-Chávez et al. (2017), y para la cuantificación de los elementos químicos se utilizó la técnica de Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Los resultados de los parámetros físicos y químicos presentaron diferencias significativas entre los tres polígonos. Los hidrocarburos en el P3 se encontraron por arriba de los límites máximos establecidos. De los elementos estudiados de acuerdo con NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se encontró que superaron los límites de la siguiente manera: en el P1 $Cd > Ni > V$, en los P2 y P3 solo se encontró Cd. El mapa de pendientes mostró la hídrica superficial del terreno y se obtuvo que la dispersión de los metales pesados es ocasionada por el arrastre de partículas generado por los escurrimientos provenientes de las zonas de mayor altitud afectando al P2. El mayor aporte de estos contaminantes al P1 es ocasionado por los fertilizantes fosfatados utilizados para el cultivo.

Palabras claves: edafología, fertilidad, agroquímicos, metales pesados, suelos

ABSTRACT

Agriculture is the main source of income in the state of Tabasco, currently there has been low crop productivity due to various limitations. The objective was to carry out a study of fertility, hydrocarbon contamination and chemical elements in soils used for agricultural purposes. The samples were taken considering: a first polygon treated with inorganic products (P1), a second with organic products (P2), and a third polygon (P3) close to an Urban Solid Waste Dump (TRSU), as it is a possible source of contamination. The methodology used for the determination of the physical and chemical parameters was carried out in accordance with NOM-021-SEMARNAT-2000, the TPH were only determined in P3 and the SARA fractions were obtained using the method of Martínez-Chávez et al. (2017), and for the quantification of the chemical elements the Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP-OES) technique was used. The results of the physical and chemical parameters showed significant differences between the three polygons. Hydrocarbons in P3 were found above the maximum established limits. Of the elements studied according to NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, it was found that they exceeded the limits in the following way: in P1 $Cd > Ni > V$, in P2 and P3 only Cd was found. The slope map showed the surface water of the land and it was found that the dispersion of heavy metals is caused by the drag of particles generated by the runoff from the areas of higher altitude affecting P2. The greatest contribution of these pollutants to P1 is caused by the phosphate fertilizers used for the crop.

Keywords: edaphology, fertility, agrochemicals, heavy metals, soils

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

La contaminación de los suelos originado por actividades antropogénicas, dentro de las cuales destaca la agricultura, afectando a este medio natural por el empleo de productos químicos y el efecto nocivo que ocasiona al medio ambiente, la salud de la población, seres vivos, etc. Esta es una problemática que se ha incrementado a lo largo de la evolución agrícola ocasionando la presencia de Metales Pesados (MP), por lo cual es un importante tema de interés de investigación para aportar soluciones y reducción de estos contaminantes. El uso de pesticidas e insecticidas en la agricultura han dado resultados ventajosos al agricultor, producir más y obtener mejores productos, pero presenta la posibilidad de que queden residuos de estos químicos cuando se consumen los alimentos (Sato & Inayat, s/f). Sin embargo, se han buscado diversas alternativas como el uso de productos orgánicos, compostas, fertilizantes humus de lombriz que aporten eficiencia de producción, calidad y mejoramiento del fruto, reducción de contaminantes, fertilidad de suelo, bajos costos, entre otras. El uso prolongado de fertilizantes químicos sintéticos lleva a un desmejoramiento del suelo y daños a la estructura edáfica; sin embargo, se pueden evitar por medio de la utilización de fertilizantes orgánicos (Dostert et al., 2011).

Bajo este contexto, la comunidad La Piedra 2da perteneciente a Cunduacán, Tabasco, cuenta con zonas agrícolas extensas; además, los agricultores no tienen conocimiento de los productos que utilizan estén libres de MP y esto ha permitido que la población local se encuentre expuesta a este tipo de contaminación. En este trabajo, se planteó como objetivo determinar la presencia de MP y analizar la calidad de los suelos a partir de análisis en muestras de suelo y su relación con la migración de los contaminantes a lo largo del perfil edafológico hasta el nivel freático en dos sitios elegidos, uno donde es trabajado con agroquímicos y otro que es tratado con productos de origen orgánico, ambas áreas con producción de cacao. Se incluyó un tercer polígono de muestreo de un tiradero de residuos sólidos urbanos (TRSU), al ser una posible fuente de contaminación de las zonas aledañas cacaoteras. Posteriormente, se compararon con los límites permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas e Internacionales para uso de suelo

agrícola. La técnica analítica que se utilizó en esta investigación es el ICP-OES (Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo), la cual ha sido utilizada en diferentes estudios y áreas de interés agrícola.

Se realizó visita de campo, descripción de las dos zonas de estudio y evaluación de otras posibles fuentes antropogénicas que pudieran estar contaminando estas zonas antes del muestreo. Si embargo, se percató la ubicación de un TRSU localizado dentro de los linderos de la comunidad campesina de la Piedra 2da, con asentamientos poblacional a menos de 50 metros y a menos de 300 m del polígono donde el suelo es tratado con productos orgánicos. A la fecha, tiene 15 años de estar inhabilitado y, debido a la carencia de calidad ambiental, como la ausencia de membranas durante su establecimiento en las pozas de lixiviación, esto ha generado un impacto ambiental en las zonas circundantes por donde transcurre el lixiviado y escorrentías superficiales derivado de los desechos contaminantes.

1.2 Objetivo general

Realizar un estudio de edafología, fertilidad, hidrocarburos totales del petróleo presentes y la cuantificación de elementos químicos mediante la técnica de ICP-OES en suelos de uso agrícola con diferentes tratamientos (con productos orgánicos e inorgánicos) para determinar la calidad del suelo.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Elaborar cartografía base y caracterización de la zona de estudio.
2. Establecer un plan de muestreo en la zona de estudio bajo las especificaciones de la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016.
3. Determinar las propiedades físicas y químicas en las muestras recolectadas de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000.
4. Cuantificar los hidrocarburos totales del petróleo presentes en la zona a través de las fracciones SARA, lixiviados en extractos PECT y el contenido de componentes polares por FTIR.
5. Cuantificar los metales por medio de Espectroscopía con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) en las muestras recolectadas de

acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA-1-2004.

6. Evaluar la concentración de hidrocarburos y metales pesados encontrados en la zona de estudio y sus posibles fuentes antropogénicas.

1.3 Pregunta de investigación

¿Los agroquímicos, la presencia de hidrocarburos y el contenido de metales cuando rebasan los límites permitidos, afectan las propiedades físicas y químicas de los suelos alterando su calidad, y no permiten un buen desarrollo en las plantas de cacao?.

1.4 Hipótesis

El uso de productos agroquímicos utilizados para mejorar las características productivas del suelo y tener un mejor desarrollo de cultivos agrícolas, contienen compuestos y elementos químicos que rebasan los límites permitidos y su uso conlleva a un riesgo en la calidad de los suelos y a daños ambientales.

1.5 Justificación

El uso indiscriminado de agroquímicos en los cultivos perjudica drásticamente a la salud de la población expuesta, así mismo, afecta al equilibrio ecológico y ambiental por la presencia de MP (Gregorich et al., 1994; Jiang et al., 2016; SEMARNAT, 2004; Srivastava et al., 2017; Steffan et al., 2017). Este grupo de productos está principalmente formado por pesticidas y fertilizantes, estos últimos usados mayormente para mejorar la producción de cosechas, siendo esta alternativa la más útil para responder a la veloz y creciente demanda de las necesidades de la población y a la problemática de la reducción de la eficiencia productiva de los suelos. El uso excesivo y desinformado de la forma correcta de la aplicación de fertilizantes químicos, presenta riesgos de contaminación del suelo y agua (Restrepo et al., 2014). Sin dejar a un lado el discriminado uso de los pesticidas para repelar, destruir o controlar plagas, entre otros, que infieren dentro de procesos de agricultura y protección de cosechas (World Health Organization, 2010).

Calabrese & Baldwin (1998 citado en Steffan et al., 2017) mencionan, que el peligro común de los químicos orgánicos xenobióticos proviene de la aplicación de pesticidas tanto en áreas rurales como urbanas, donde gran porcentaje de los químicos aplicados

llegan al suelo. Cuando se aplican pesticidas a un área forestal, el 25 % llega al follaje de los árboles, el 1 % llega al insecto objetivo y alrededor del 30 % absorbe el suelo, y el resto termina en la atmósfera y en las aguas superficiales o subterráneas. Sin embargo, el porcentaje de pesticidas que llega al suelo incrementa en los cultivos en comparación con la aplicación en áreas forestales.

La emisión de compuestos potencialmente tóxicos, originados por actividades económicas que son generadas de forma no sustentable, cumpliendo con ciertos estándares, características y concentraciones, las formas de producción utilizadas en el pasado y la escasez de especificaciones ambientales en suelos han generado la aparición de sitios contaminados y han causado investigaciones para la búsqueda de acciones que se deben llevar a cabo para remediar un sitio (SEMARNAT, 2004).

Los fenómenos relacionados con la contaminación de los suelos tienen una gran importancia por que influyen directamente en su calidad y sostenibilidad. Los MP, son una fuente de contaminación entrando de dos formas en el medio natural; a través de la roca madre enriquecida con metales (geogenética) o de forma antropogénica, tales como, la minería, industria, la fundición, la quema de combustibles fósiles, la eliminación de desechos, la corrosión, tráfico rodado, zonas de acumulación de residuos sólidos y las prácticas agrícolas (He et al., 2015; Lwin et al., 2018). El nivel de contaminación, toxicidad y peligrosidad, sin dejar a un lado su concentración, dependerá del estado y propiedades que conforman al suelo como el pH, contenido en carbonatos, MO, etc., y de las propiedades del metal contaminante (García et al., 2002). Si comparamos los MP con los contaminantes orgánicos, estos no pueden ser degradados biológica o químicamente, persisten generalmente en el entorno del suelo en periodos prolongados después de la introducción, dando como resultado la degradación de suelo/agua y defectuoso funcionamiento del ecosistema (Lwin et al., 2018).

Es importante la evaluación de la contaminación del suelo, esto implica el muestreo de suelos representativos en un área problemática, el análisis de metales y parámetros fisicoquímicos relacionados, así como la comparación de la cuantificación del contaminante con las normas reglamentarias (He et al., 2015). Además, con el rápido desarrollo económico, los costos ambientales también están aumentando

significativamente (Jiang et al., 2016). La gestión ambiental permite utilizar los datos para planificar e implementar medidas para reducir o prevenir la degradación ambiental del suelo. Las enmiendas comúnmente aplicadas para el tratamiento de MP se clasifican por agentes inmovilizadores en dos categorías: orgánicos e inorgánicos. Las compostas orgánicas y estiércoles son empleadas para la biorremediación, reduciendo la biodisponibilidad de MP en suelos contaminados y favoreciendo a la vegetación (Lwin et al., 2018).

Las personas que tienen un efecto perjudicial en su salud son los agricultores, trabajadores de la construcción o mineros, a través del contacto directo que tienen con el suelo, pero la salud de todos se ve afectada por el suelo hasta cierto punto. Esto se debe a que el suelo proporciona muchos de los nutrientes que necesitamos y puede transmitir sustancias nocivas a través de la exposición crónica de las partículas del suelo contaminado y por el consumo de cultivos contaminados (Huang et al., 2017; Steffan et al., 2017).

Debido a que uno de los usos de suelos más representativo en el estado es de tipo agrícola con un porcentaje de 35.85 %, en este trabajo se ha determinado la evaluación de los MP. Para esto se eligieron dos sitios dentro de la misma comunidad "La Piedra 2da" perteneciente al municipio de Cunduacán, Tabasco: uno afectado por el uso de agroquímicos y otro tratado con productos orgánicos. Los suelos son de tipo *Gleysol-Vertico*, el uso de suelo primordialmente corresponde a Agricultura de Temporal Anual y Permanente (INEGI, 2010).

Finalmente, con el propósito de conocer los indicadores que establezcan la contaminación derivada del uso de agroquímicos se propuso utilizar la técnica analítica ICP-OES, ya que con esta se permite obtener la concentración de los MP con validación de los datos y comparar los resultados con los límites permisibles según las normas nacionales e internacionales para uso de suelo agrícola.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes de área de estudio

Geología y geomorfología

La evolución geológica del sureste mexicano en el contexto regional es originada por el proceso de formación del Golfo de México, que inicia su apertura con la fragmentación y dispersión de la Pangea (Padilla y Sánchez, 2007). La Provincia del Sureste Mexicano clasificada de acuerdo con su formación tectónica, está integrada por cuatro cuencas: Pilar Reforma-Akal, Macuspana, Salina del Istmo y Comalcalco. El área de estudio de esta investigación se encuentra dentro de esta última, asociada su formación con una fuerte carga de sedimentos y evacuación de sal (CNH, 2023).

La planicie Fluviodeltaica se encuentra constituida por sedimentos aluviales con variaciones de altura de 1 a 15 msnm. Los cauces de los ríos aumentan la superficie de inundación en el plano fluvial, y se desarrollan diques naturales bien drenados con sedimentos limosos a arenosos depositados durante las inundaciones extraordinarias; en zonas posteriores a los diques, se ubican amplias llanuras de inundación sobre sedimentos arcillo limosos acumulados por el flujo de aguas tranquilas (Ramos et al., 2016). Zavala et al. (2016) clasificaron la Planicie Costera del Golfo Sur en 12 paisajes geomorfológicos.

El área de estudio se encuentra dentro de la Planicie Fluviodeltaica Inactiva con relieves planos a cóncavas y aluviones acumulados por el río Mezcalapa (Grijalva). Salazar-Ledesma (2008) menciona que la presencia de los *Vertisoles* en esta planicie para la porción del Plan Chontalpa está relacionada por la baja deposición de sedimentos arcillosos del río Mezcalapa por más de 300 años antes de su cambio de curso hacia el este, aportando su carga sedimentaria a la zona situada entre Cárdenas, Villahermosa y el Golfo de México. Esto condujo a su inactividad al no recibir aluviones por el control del sistema de presas en la cuenca media del río Grijalva, por los bordos de protección y del sistema de drenes en la planicie del Plan Chontalpa para evitar inundaciones. Como resultado de la intensificación de los procesos de agrietamiento y expansión del suelo se presentan los *Cambisoles* (Zavala et al., 2016).

Provincias fisiográficas

El área de estudio forma parte de la Provincia Fisiográfica “Llanura Costera del Golfo Sur”, la cual está integrada por Subprovincias, ubicándose específicamente en la Subprovincia Fisiográfica “Llanura y Pantanos Tabasqueños” (INEGI, 2010). Esta subprovincia está caracterizada por la presencia de lomeríos y planicies formados debido a las oscilaciones del nivel del mar por las glaciaciones del Pleistoceno, así como erosión fluvial que durante su mecanismo de acción fue dejando remanentes de aluviones para la formación de la fisiografía del lugar (CONAGUA, 2020).

Edafología y uso de suelo

Se encuentra la presencia de suelos en el municipio de Cunduacán de origen Palustre (49.00 %), aluvial (43.60 %) y lacustre (0.42 %), el porcentaje restante corresponde a zona Urbana (6.72 %) y Cuerpos de Agua (0.26 %). Dentro de la información edafológica, los suelos predominantes del municipio son Gleysol (44.29 %), Phaeozem (28.43), Vertisol (17.87 %), Fluvisol (1.89 %) y Cambisol (0.54 %). El uso de suelos más destacados en la región es: Pastizal cultivado (50.99 %), agricultura (35.85 %) y zona urbana (6.72 %), caracterizada por contar con vegetación Tular (5.98 %) y pastizal inducido (0.20 %) (INEGI, 2010). En las figuras 10 y 11 (descripción del área de estudio), se puede ver la distribución de la clasificación de edafología y uso de suelo para el municipio.

Cultivos y vegetación en el área de estudio

Los cultivos más importantes en el área de estudio son: plátano, cacao, maíz, frijol, coco, café, pimienta, mango, naranja y ajonjolí (CONAGUA, 2020).

Hidrología superficial y subterránea

La superficie del acuífero de Samaria-Cunduacán cubre los municipios de Centro, Cunduacán, Nacajuca, Villahermosa y Cárdenas. El acuífero queda localizado dentro de la Región Hidrológica No. 30 “Río Grijalva-Usumacinta”, la cual drena a la Cuenca No. 30D Río Grijalva-Villahermosa (CONAGUA, 2020).

Clima

Este municipio presenta un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, precipitación promedio anual 1 925.3 mm y una temperatura promedio anual de 27.1 °C (INEGI, 2015).

2.2 Contaminación en suelos por vertederos

Balcazar et al., (2020), estudió los efectos de contaminantes en suelo por un vertedero a cielo abierto en Tabasco, presentando retención y acumulación en altas concentraciones de los metales como Cd, Ni, Cr y Pb. En este mismo sentido, Dávila et al., (2024), mencionan en su trabajo que los residuos sólidos urbanos (RSU) acumulados, liberan gases tóxicos como hidrocarburos ligeros (HCB), metano (CH₄), sulfuro de hidrógeno (H₂S), óxidos metálicos, metales pesados, entre otros, que pueden migrar al suelo y al agua subterránea por percolación y lixiviación. Además, demostraron que los metales provenientes de los lixiviados en ese vertedero son retenidos en el suelo evitando su migración al agua subterránea.

2.3 Contaminación en suelos por metales pesados

2.3.1 Antecedentes regional

Puesto que existen diferentes fuentes de contaminación, Siebe et al., (2005) reportó que tomaron muestras de suelo y aguas freáticas de la llanura aluvial baja del Activo Cinco Presidentes en el estado de Tabasco. Se caracterizó por ser una investigación sobre la determinación de la distribución de MP. Se obtuvo que los niveles de fondo establecidos a partir de lo encontrado en sitios control fueron relativamente altos en la zona y en algunas localidades se rebasan ligeramente los intervalos considerados como normales para Ni, V, Cu, Zn y Cr. Así mismo, se encontraron diferencias significativas en los contenidos de MP totales entre las diferentes localidades muestreadas dentro del Activo Cinco Presidentes.

Adicionalmente, se encuentra el trabajo realizado por Flores et al. (2018) en la Laguna de las Ilusiones, ubicada en Villahermosa, Tabasco, México. Este indica que la biota ha sido afectada por descargas ilícitas de aguas negras procedentes de las viviendas cercanas, desechos de hospitales y por la infiltración de otras lagunas contaminadas,

resultado de la cuantificación de MP. En este trabajo a diferencia de otros usaron la técnica analítica por espectroscopia de absorción atómica (AAS). Mostrando que la concentración de MP en los sedimentos superficiales al ser comparados con las normas canadienses y americanas, sobrepasan los límites de permisibilidad establecida en cuerpos de agua dulce, pero no pasan el límite establecido por la norma mexicana.

En este sentido, otro tipo de investigación efectuada a muestras de sedimentos colectadas en ocho sitios en la reserva de la Biosfera de los pantanos de Centla, Tabasco. Según lo reportado por (Domínguez et al., s/f), se identificaron y cuantificaron en un espectrofotómetro de absorción atómica, las concentraciones de tres MP: Cd, Pb y V. La media de las concentraciones determinó que la zona de estudio se encuentra contaminada por Cd de acuerdo con las directrices canadienses de la calidad de los sedimentos, con concentraciones que oscilan entre los 30.673 y 12.272 mg/kg.

2.3.2 Antecedentes nacional

Una fuente de contaminación relacionadas con las actividades agrícolas como lo reporta Cajuste et al. (2001), resultado del uso directo del agua residual para irrigar cultivos desde hace más de 100 años en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, donde se han acumulado MP en los suelos.

Por otra parte Ximhai et al. (2012), presenta una revisión sobre las principales causas y efectos de la desmedida aplicación de plaguicidas en los cultivos sembrados en Sinaloa, lo que repercute en el aumento de contaminación de los suelos, sistemas lagunares y mantos freáticos. La información obtenida reflejó una alta cantidad de sustancias tóxicas provenientes de la actividad agrícola al ambiente, por lo que el riesgo de que los residuos de los plaguicidas contaminen al suelo, sistemas lagunares y mantos acuíferos es también alta. Por lo cual, este autor recomienda realizar trabajos de investigación, acciones y aplicación de las normas regulatorias más exigentes a fin de bajar los aportes de estas sustancias en el ambiente.

Cordero (2018), realizó una investigación en el ejido de Cerrito Blanco, perteneciente al municipio de Matehuala, S.L.P., donde determinaron las propiedades fisicoquímicas del suelo, posteriormente para obtener el arsénico total usaron ICP-OES y Fluorescencia de rayos X. Donde los resultados permitieron determinar que toda la zona agrícola se

encuentra enriquecida de arsénico, el cual excede 8 veces lo permitido. A pesar de la baja conductividad hidráulica del suelo agrícola, el As es transportado a lo largo del perfil del suelo. Esto se presenta como consecuencia tras la irrigación por largo tiempo con agua contaminada con As.

2.3.3 Antecedes internacional

Por otra parte, internacionalmente una investigación realizada por Onder et al. (2006), utilizaron muestras césped y suelo de áreas verdes de diferentes áreas del centro de la ciudad de Konya, Turquía. Los metales en los extractos fueron analizados por ICP-OES. El diseño topográfico de la región contaminada, la dirección dominante del viento y la idoneidad del plan de asentamiento de la ciudad determinaron que la contaminación afecta al aire. Con esta técnica se pudo determinar que las personas que viven en el centro de la ciudad se ven afectadas por los MP de la contaminación del aire y también por comer vegetales contaminados.

Otro estudio, reportado por Farooq et al. (2006), donde recolectaron muestras al borde de la carretera en algunos condados del norte de Inglaterra y se analizaron en busca de MP (Cd, Cu, Pb, Zn) para determinar las diferencias en la concentración de cada metal entre las diferentes zonas marginales.

Aunado a esto, un trabajo reportado en el sur de Jiangsu China por Jiang et al. (2016), donde recolectaron muestras de suelo de una típica ciudad rural-industrial para investigar la distribución de la concentración de MP, el riesgo para la salud y sus concentraciones mediante un modelo con análisis geoestadístico. Las muestras se digirieron con una mezcla típica de ácido concentrado y la presencia de los MP se midieron mediante un ICP-MS. Los resultados permitieron gestionar esfuerzos para reducir estas fuentes antropogénicas y el efecto de la contaminación del suelo en los riesgos para la salud humana.

Jiang et al. (2016 citado en Santos et al., 2017), desarrollaron una investigación con enfoque ambiental para calcular la distribución espacial de las anomalías geoquímicas de la región de los Andes Peruanos en suelos y los métodos de interpolación Kriging ordinarios para obtener mapas geoquímicos que revelen el grado de contaminación. Los problemas fundamentales de contaminación en las cuencas estudiadas de Cajamarca y

Huancavelica (Perú) se derivan principalmente de la remoción de MP de zonas de alteración y áreas mineras ubicadas a gran altura. Los contenidos totales de MP se determinaron por ICP-MS y se caracterizaron por presentar altas concentraciones de MP potencialmente tóxicos.

Así mismo, el realizado por Franco y Scaldaferro (2017) en el embalse el Guájaro en sedimentos superficiales, mostraron la evaluación y obtención de los niveles de concentraciones de MP y plaguicidas, y el impacto de la agricultura sobre dichas concentraciones en el distrito de riego Repelón, Atlántico. Los resultados obtenidos por el Factor de Contaminación indicaron que el Cd era el elemento más enriquecido en los sedimentos del embalse debido a los residuos industriales y agrícolas que se descargan al cuerpo de agua.

Huang et al. (2017), desarrollaron un método de evaluación integrado de la contaminación por MP y el riesgo potencial para la salud de los residentes en un área periurbana típica en el sureste de China con diversas fuentes de emisiones antropogénicas y sistemas de cultivo. Las concentraciones de MP se determinaron mediante ICP-OES, las de Cd se mide mediante ICP-MS, el Hg y el As se analizaron por espectrometría de fluorescencia atómica (AFS). La distribución y los índices de contaminación se analizaron utilizando ArcMap 10.0 con interpolación de ponderación de distancia inversa (IDW). Este trabajo condujo a la integración y una visión general de las diversas técnicas analíticas, a través de las cuales se pueden obtener medidas de estos contaminantes.

En 2019, realizaron Fang et al. una evaluación de los MP del suelo para caracterizar su distribución y contaminación bajo diferentes tipos de uso del suelo en la ciudad de Xuzhou, China. Usaron sistema de información geográfica (SIG) y métodos integrados estadísticos para analizar los patrones espaciales de los MP. Posteriormente, determinaron el grado de contaminación del suelo, empleando varios factores e índices para su cálculo. Además, midieron la concentración con ICP-MS y así pudieron argumentar que se debe prestar más atención a la contaminación por MP de las tierras de cultivo, las áreas urbanizadas y los suelos de las áreas mineras en Xuzhou.

Adimalla (2019), menciona que es esencial comprender los niveles de contaminación de MP en los suelos urbanos y su efecto perjudicial sobre la salud humana y también el patrón de distribución espacial en cualquier región. En este sentido, la evaluación de los niveles de concentración es una obligación para los productores agrícolas y los agrotécnicos, dado que hoy en día los parámetros de calidad exigen productos libres de contaminantes (Mendoza et al., 2021).

De igual forma, Adimalla (2020) realizó un estudio en los suelos urbanos de la provincia de Medak en India. La esencial importancia fue comprender el impacto en la salud humana de niños y adultos por la contaminación de MP. Donde la fuente primaria es la ingesta y en segundo término la inhalación y los contactos dérmicos, lo que implica que los niños y adultos enfrentaban el mayor riesgo para la salud en la región de estudio.

Mendoza et al. (2021) evaluaron los riesgos de contaminación por MP en suelos agrícolas de la localidad de Turén al noroccidente de Venezuela bajo dos sistemas de labranza (convencional y siembra directa) en dos posiciones fisiográficas (alta y baja). Determinaron el contenido de arcilla, limo y arena, así como sus propiedades físicas y químicas. Realizaron cuantificación con la técnica AAS y en ambos sistemas de labranza se observó una tendencia a la acumulación de MP en la napa baja, encontrándose que la acumulación de arcilla está relacionada al incremento de MP en el suelo, debido a que estas poseen cargas negativas en su superficie o en el espacio interlaminar que confiere a los suelos la capacidad de retener elementos. En el suelo estudiado predominaron los óxidos de Si, Ti, Fe y Mn, lo que favoreció la adsorción de los MP.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 Suelos

El suelo según García et al. (2002) está formado por material inorgánico (arena, limo y partículas arcillosas), materia orgánica, agua, gases y organismos vivos (lombrices, insectos, algas, bacterias, hongos, etc.), entre los que se produce un intercambio continuo de moléculas mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

3.1.1 Fases que componen el sistema suelo

La fase sólida, compuesta por el conjunto de las partículas inorgánicas (cristalinas y no cristalinas) y orgánicas; la líquida, que la componen el agua y los solutos que están disueltos en ella; y por último la gaseosa o atmósfera del suelo, formada por todos aquellos compuestos que se presentan en forma gaseosa y cuyos representantes más abundantes, en condiciones de aireación adecuada del suelo son el CO₂, O₂ y vapor de agua (Jaramillo, 2002).

3.2 Propiedades macromorfológicas del suelo

Las propiedades macromorfológicas incluye la estructura, color y perfil edafológico, propio y característico para cada tipo de suelo

3.2.1 Estructura

Implica un arreglo u ordenación de las partículas primarias (arena, limo y arcilla) y secundarias (agregados de partículas primarias) en ciertos modelos o patrones estructurales, lo que incluye también al espacio de poros asociado (Baver et al., 1973).

La caracterización de la estructura del suelo en el campo consiste en describir los tres parámetros que la califican: el tipo, la clase y el grado de desarrollo que presente. El grado de la estructura se estima observando la nitidez con que están definidos los peds (terrones o agregados de suelo), así como la resistencia que ofrecen a ser separados cuando se someten a presión; para caracterizar esta propiedad se usan términos relativos como débil, moderada y fuerte (Jaramillo, 2002).

3.2.2 Color

Ramírez (1997) lo define como: “una de las características que está ampliamente relacionada con la temperatura, la dinámica de los elementos, la movilidad del agua en

el suelo, el contenido de materia orgánica, la cantidad de organismos, la evolución de los suelos, entre muchos otros factores. Es una propiedad descriptiva en campo donde se pueden deducir diferentes procesos y fenómenos que han ocurrido en el suelo desde su origen de formación y en épocas actuales”.

3.2.3 Perfil edafológico

Lo define Navarro (2003) como: “la exposición vertical de una porción superficial de la corteza terrestre que incluye todas las capas u horizontes que han sido alteradas durante el periodo de su formación, junto con las más profundas que influyeron en su génesis”.

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo.

	Sistema del depto. de Agricultura de EE.UU.	Sistema internacional
Fracción del suelo	Diámetros límites en mm	Diámetros límites en mm
Arena muy gruesa	2.00-1.00	
Arena gruesa	1.00-0.50	2.00-0.20
Arena media	0.50-0.25	
Arena fina	0.25-0.10	0.20-0.02
Arena muy fina	0.10-0.05	
Limos	0.05-0.002	0.02-0.002
Arcilla	menos de 0.002	menos de 0.002

3.3 Propiedades físicas del suelo

3.3.1. Textura

La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; el tamaño de partículas, estableciendo tres clases: arena (A), limo (L) y arcilla (Ar). Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen favorecerán la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición. Se han propuesto varias clasificaciones de las fracciones, dos de las más importantes (ver en *Tabla 1*) son las establecidas por el Departamento de Agricultura de U.S.A. y la propuesta últimamente por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (Rucks et al., 2004). Sin embargo, se pueden encontrar suelos que presenten valores

semejantes de textura, pero con propiedades físicas muy distintas, según el tipo de estructura que se halle presente (Jordán, 2005).

Apreciación de la textura en el terreno

Una idea de la textura definida en el terreno puede anticipar los resultados del análisis en laboratorio. La importancia se presenta cuando el edafólogo debe elegir un perfil representativo de la zona estudiada para extraer las muestras que enviará al laboratorio. Existen dos procedimientos de apreciación rápida que se complementan, uno visual, otro al tacto (Jaramillo, 2002; Rucks et al., 2004).

3.3.2 Densidad y porosidad

La densidad aparente (DA) definida como la relación existente entre la masa y el volumen de suelo incluyendo el espacio poroso total existente. Es una propiedad física del suelo que indica las condiciones en las cuales se encuentra en relación con la compactación, la porosidad, la disponibilidad de agua y de oxígeno, entre otras. A diferencia, la densidad real (DR) es la relación entre la masa de las partículas de suelo y el volumen de éstas sin considerar el espacio poroso, con estas relaciones es posible obtener el valor correspondiente de la porosidad (PO) (Ramírez, 1997).

3.3.3 Materia orgánica

La determinación de materia orgánica (MO) del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico y la oxidación de este por medio de una disolución determinada. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo (SEMARNAT, 2000).

3.4 Propiedades químicas del suelo

3.4.1 Intercambio iónico

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El cambio iónico es debido casi en su totalidad a la fracción de arcilla (Ar) y a la materia orgánica (MO). La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se define como el número de cargas negativas del suelo. Aumentos en el pH traen como consecuencia un

incremento en las cargas negativas, ya que el aluminio se precipita y la concentración de hidrogeniones disminuye, por lo tanto, la CIC aumenta (Ramírez, 1997).

3.4.2 Capacidad de campo (CC)

La relación suelo-agua se usa porque representa la relación reproducible, de la cual puede obtenerse un extracto para el análisis de cationes y aniones solubles, esta relación implica de una manera predecible el contenido de humedad o capacidad de campo (CC) (SEMARNAT, 2000).

3.4.3 Potencial de hidrógeno (pH)

De esta propiedad depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas, determinando su solubilidad y la actividad de los microorganismos, los cuales mineralizan la materia orgánica. También determina la concentración de iones tóxicos, la CIC y diversas propiedades importantes que en últimas apuntan a la fertilidad del suelo (Ramírez, 1997).

3.4.4 Conductividad eléctrica (CE)

Es la propiedad de un material que le permite conducir el flujo de la electricidad. A nivel edafológico, consiste en la valuación de la concentración salina del suelo a nivel de laboratorio (SEMARNAT, 2000).

3.5 Calidad del suelo

Para poder establecer la calidad de un suelo, el estudio de todo tipo de propiedades (físicas, químicas, biológicas y microbiológicas) es imprescindible (García et al., 2002). Para poder definir el concepto de calidad del suelo se debe establecer el uso de este, ya que está fuertemente ligada y mantienen una amplia correlación. Mantener o mejorar la calidad del suelo se muestra como un factor clave nutritivo en los recursos del suelo del mundo. La alta calidad de los suelos no solamente podrán ser los mejores productores de alimentos y fibra para el crecimiento de la población mundial, pero esto además juega una mejor función en la estabilidad natural de los ecosistemas y en el mejoramiento del aire y calidad del agua (Gregorich et al., 1994).

3.5.1 Tipos de suelos según su uso

Como definición, el uso de suelo se refiere a las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal (Trucíos et al., 2013). Los usos de suelo son de tipo:

- a) Agrícola: Se utiliza para el cultivo y la recolección de cultivos y ganado. Se ubican en ranchos o granjas. Para elegir un buen terreno agrícola, es necesario hacer investigaciones previas.
- b) Residencial: Suelo utilizado principalmente para vivienda, con asignaciones limitadas para usos que son complementarios o sirven a usos residenciales básicos.
- c) Comercial: Como su nombre lo indica está destinado a comercios y almacenes.
- d) Industrial: Es el destinado a la construcción o alojamiento de parques empresariales, polígonos industriales o empresas del sector secundario dedicadas en la obtención y tratamiento de diferentes materias primas y objetos.

3.5.2 Tipos de contaminación del suelo

La contaminación es originada por dos fuentes principales, definidas según (Bravo Inclán et al., 2009) como:

- a) Puntual: desde una perspectiva general, está representada por efluentes de agua residual fácilmente identificables, por ejemplo, una descarga al final de una tubería o canal.
- b) Difusa: se determinan como los más complejos y difíciles, involucrando el transporte y transformación de desechos a través de varios medios, como la deposición atmosférica, aplicación de un contaminante en el suelo y la transformación química en suelos, involucrando el aire, suelo y agua. No se puede regular directamente las emisiones de fuentes de contaminación difusa. El mecanismo mediante el cual se inicia el transporte de contaminantes de las fuentes no puntuales es la lluvia, iniciando el escurrimiento, ocasionando los procesos erosivos que arrastran una gran cantidad de suelo y sedimentos en conjunto con los contaminantes, y terminan depositados en los cuerpos de agua superficiales.

3.5.3 Estándares de calidad ambiental

La calidad del agua, el aire y el suelo de uso residencial, industrial y agrícola es evaluada y comparada con las normativas Nacionales (ver *Tabla 2*) e internacionales (ver *Tabla 3*) de los estándares de calidad ambiental. La valorización de estándares de calidad y límites máximos permisibles de los países (ver *Tabla 4*, límites máximos permisibles en suelos) permiten conocer la situación ambiental de la provincia a estudiar con el objetivo de identificar y establecer los niveles de concentración tanto de elementos como de sustancias que están presentes en el medio ambiente.

Tabla 2. Normas mexicanas de calidad y evaluación ambiental.

Normas Nacionales	Descripción
Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (n.d.)	Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT 2000 (2003)	Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 (n.d.)	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
Norma Oficial Mexicana NOM-138 SEMARNAT/SSA1-2012 (2012)	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (2004)	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y/o V.

Tabla 3. Normas internacionales de calidad y evaluación ambiental.

Normas Internacionales	
Norma Oficial de Ecuador (n.d.)	Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.
ECA para suelos de Perú	Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de Perú.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 4. Normas nacionales e internacionales y sus límites máximos permisibles en suelos.

	NOM 147-SEMARNAT	NOM 004-SEMARNAT 2002	NOM 021-SEMARNAT-2000		Norma de Ecuador	ECA para suelos de Perú	Elementos de suelo Montana I	Elementos en los estándares
			Micronutrientes	Metales contaminantes				
	Uso agrícola, residencial y comercial	Metales pesados en Biosólidos			Uso de suelo agrícola	Uso de suelo agrícola		
			mg/kg					
As	22	41			12	50	X	X
S					500			
Ba	5400				750	750 (BarioTotal)	X	X
Be	150							X
Cd	37	39		3-5	2	1.4	X	X
Cr VI	280	1200			0.4	0.4		
Cu		1500	Deficiente <2.5				X	X
Sn					5			
Fe			Deficiente <1.0				X	X
Mn			Deficiente <0.2				X	X
Hg	23	17			0.8	6.6	X	
Ni	1600	420		100	50			X
Ag	390							X
Pb	400	300		100-300	100	70	X	X
Se	390				2			X
Tl	5.2				1			X
V	78				130			X
Zn		2800	Deficiente <0.5		200		X	X

Norma de Ecuador: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de para suelos contaminados-Ecuador, ECA para suelos de Perú: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de Perú, Elementos de suelo Montana I: Elementos que contiene el suelo de referencia certificado Montana I, Elementos en los estándares: Elementos contenidos en los estándares S7A 20

3.6. Fuentes contaminantes

3.6.1 Agroquímicos

Los pesticidas según la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (World Health Organization, 2010) son una sustancia o mezcla de sustancias y/o microorganismo e incluyendo virus para repelar, destruir o controlar plagas, incluyendo vectores humanos y enfermedad animal que interfieren con la producción, proceso, almacenamiento, transporte, comercialización de alimentos. Además, regula el crecimiento de plantas y es un agente para fijar, reducir o prevenir la prematura caída de las frutas; usado para aplicar a los cultivos antes o después de la cosecha para proteger el producto del deterioro durante el almacenamiento y el transporte.

3.6.2 Metales pesados

Desde la perspectiva química, los metales pesados (MP) se pueden definir como los elementos metálicos cuyo peso específico es mayor a 5 g/cm^3 o número atómico mayor a 20. Por otro lado, se les conoce como aquellos elementos que por su toxicidad y persistencia en el ambiente son considerados como contaminantes ambientales (García et al., 2002).

En contaminación ambiental, los elementos trazas se refiere a aquellos que están presentes en un medio o sistema en concentraciones muy bajas y que su concentración disponible es suficiente para ser tóxicos para los organismos (González et al., 2017).

Clasificación de los metales pesados según López (2007):

- **Oligoelementos o micronutrientes:** son los requeridos en cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn. Sin embargo, pasando cierto límite biológico se vuelven tóxicos. No obstante, la ausencia de estos micronutrientes causa enfermedades y su exceso intoxicaciones.
- **Metales pesados sin función biológica:** su presencia en determinadas cantidades en los seres vivos, generan disfunciones en el organismo, produciendo inhibición de las actividades enzimáticas. Son altamente tóxicos y presentan la propiedad

de acumularse en los organismos vivos. A este grupo pertenecen principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

A continuación, se describen las características y efectos que causan en los suelos la presencia de los metales más tóxicos y dañinos para seres vivos y medio ambiente, encontrados principalmente en los suelos:

3.6.2.1 Cadmio (Cd)

Es uno de los elementos más tóxicos y su movilidad en el medio depende de varios factores (pH, el potencial redox, la cantidad de MO y la presencia de arcillas y óxidos de hierro). Este elemento es emitido al medio por las actividades industriales, minería, metalurgia, fabricación y aplicación de fertilizantes de fosfato y de la incineración de residuos urbanos. Sin embargo, su uso ha decrecido en las últimas décadas debido al peligro para la salud que supone (Sánchez & Casermeiro, 2016).

3.6.2.2 Níquel (Ni)

Este elemento es esencial para la formación de glóbulos rojos, pero cuando se inhala, ingiere, o absorbe en exceso puede llegar a ser muy tóxico, llegando a afectar a la próstata, al corazón, pulmones, laringe y nariz. Se utilizan en la aleación del acero, se encuentra presente en cantidades muy bajas en el ambiente y en la cadena alimentaria. No obstante, se tendría que haber un consumo muy elevado de este elemento puede llegar a intoxicar y contaminar. Sin embargo, la intoxicación por níquel suele proveerse por alimentos que crecen en suelos muy contaminados pasando esas cantidades de MP a la cadena alimentaria (López, 2007).

3.6.2.3 Vanadio (V)

Se encuentra como contaminante en ríos, lagos, océanos, en aguas subterráneas y superficiales mayormente por el impacto de la minería. Concentraciones pequeñas son retenidas en productos derivados del petróleo y se produce la contaminación por el proceso de refinado y uso de combustibles fósiles. Principalmente, se distribuye en los sistemas acuáticos a través de la liberación de rocas primitivas, del suelo y por el transporte en las aguas. En humanos, la toxicidad ocasiona perturbaciones en el sistema nervioso central, temblor y deterioro en reflejos condicionados, habilidades cognitivas reducidas y congestión de la médula espinal, entre otros (Alvarado, 2016).

3.6.3 Origen de los metales pesados

Como definición, se conoce al origen antropogénico a la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados (López, 2007). La contaminación antropogénica, genera una afectación de carácter más local, sin en cambio la contaminación geogénica (de origen natural) afecta a grandes áreas. Las fuentes naturales de origen geogénico presentes en la corteza terrestres son producto de la meteorización y el lixiviado de las rocas o por emisiones volcánicas (Huisha & Pichucho, 2022).

3.7 Técnicas de separación y extractivas de muestras en laboratorio

Conocido como los procesos mediante los cuales el analito se separa de la matriz, eliminando así las posibles interferencias e incrementando la concentración del analito (Vargas, 2018). Algunas técnicas de extracción más usadas se muestran en la *Figura 1*:

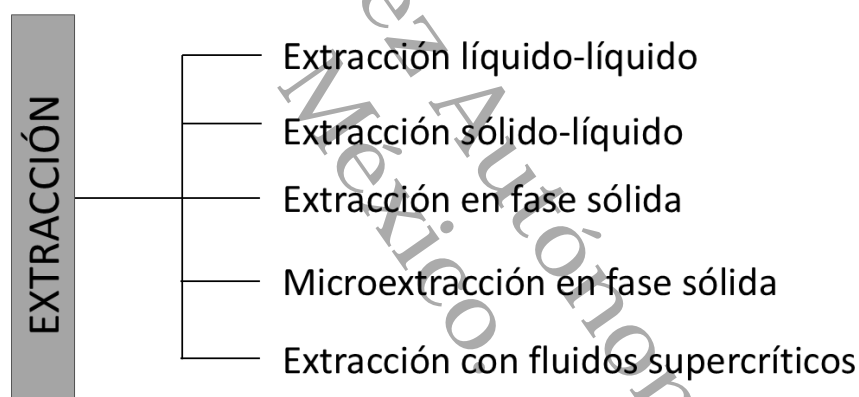


Figura 1. Técnicas de separación y extracción.

Extracción líquido-líquido

Esta consiste en la transferencia que se lleva a cabo entre dos líquidos inmiscibles de una fase a otra, consideradas fase acuosa y fase orgánica (Matthew et al., 2023).

Extracción sólido-líquido

Proceso de separación de uno o más componentes de una mezcla sólida mediante un disolvente líquido. La primera etapa, se presenta en el contacto del disolvente con el sólido que cede el componente soluble (soluta) al disolvente. En la segunda etapa del proceso hay una separación de la disolución del resto del sólido. Finalmente, una vez

que se ha saturado el disolvente, se separa del sólido que queda, normalmente por filtración (Matthew et al., 2023).

3.7.1 Extracción continua del método Soxhlet

Consiste en la separación con un líquido de una fracción específica de una muestra, dejando el resto lo más íntegro posible. Se pueden realizar desde los tres estados de la materia: extracción sólido – líquido; extracción líquido – líquido y extracción gas – líquido (Núñez, 2008). Se menciona que una de las técnicas más utilizadas en la extracción de hidrocarburo en cuanto a fracción pesada de petróleo es el método que se establece en la norma mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006 (SEMARNAT, 2006) utilizando el Soxhlet.

3.7.2 Extracto PECT (proceso de extracción de contaminantes tóxicos)

Este tipo de extracción líquido – líquido se realizan en muestras de rellenos sanitarios y pruebas para la remediación de suelos, esta prueba es conocida como lixiviación o prueba de extracción de compuestos tóxicos (PECT) basada en la norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 (1993), se considera como criterio aceptado para determinar la no peligrosidad de una muestra de residuo. El límite máximo permisible de hidrocarburos para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 15 mg/L. En el lixiviado PECT se considera contaminada el cuerpo de agua con residuos o materiales peligrosos por toxicidad al sobrepasar el límite de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003).

3.8 Espectroscopía

Como definición, los métodos espectrométricos están integrados por un gran grupo de métodos analíticos que se basan en la espectroscopía atómica y molecular (Skoog et al., 2008).

3.9 Espectroscopía por absorción molecular en las regiones ultravioleta y visible

Dentro de las técnicas de espectroscopía molecular, se encuentra la espectroscopía infrarroja, que al complementarse con la espectrofotometría Ultravioleta-visible (UV-vis), permiten obtener información estructural de la materia (Velandia, 2018).

La espectroscopía por absorción molecular se basa en la medición de la transmitancia (T) o de la absorbancia (A) de soluciones que están en celdas transparentes que tienen

una longitud de trayectoria (b). Normalmente, la concentración de un analito absorbente se relaciona en forma lineal con la absorbancia según la ley de Beer:

$$A = -\log T = \log \frac{P_0}{P} = \epsilon bc$$

donde: P_0 es la potencia radiante incidente, P es la potencia radiante transmitida, A es la absorbancia, T es la transmitancia, b es la longitud de trayectoria de la muestra, c la concentración del absorbente y ϵ es la absorptividad molar. Esta ley se puede aplicar a un medio que contenga más de una clase de sustancias absorbentes (Skoog et al., 2008).

Sin embargo, se pueden presentar efectos de reflexión y atenuación del haz que se proyecta hacia la muestra; si estas se realizarán experimentalmente en el laboratorio. Los efectos de reflexión se originan a través de las dos interfases aire/pared del recipiente y en las dos interfases pared/solución; por otro lado, la atenuación del haz puede ocurrir por los efectos de la dispersión causada por moléculas grandes y porque lo absorben las paredes del recipiente. Para compensar estos efectos, la potencia del haz transmitido por la solución del analito se compara con la potencia del haz transmitido por una celda idéntica que contiene sólo solvente. En este mismo sentido, la transmitancia y absorbancia experimentales que se aproximan de manera notable a la transmitancia y absorbancia verdaderas se calculan con las ecuaciones:

$$T = \frac{P_{\text{solución}}}{P_{\text{solvente}}} \approx \frac{P}{P_0}$$

$$A = \log \frac{P_{\text{solvente}}}{P_{\text{solución}}} \approx \log \frac{P_0}{P}$$

3.10 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

El proceso del funcionamiento de esta técnica inicia con un haz de luz infrarroja que incide sobre la materia y provoca vibraciones de los átomos de la molécula. Las vibraciones son específicas a determinadas frecuencias de los enlaces químicos, que corresponden a niveles de energía de la molécula, y van a depender de la forma de la

superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y del acoplamiento vibracional (Velandia, 2018).

Según Skoog et al. (2008), algunas de las ventajas del uso de los instrumentos de transformada de Fourier, es el rendimiento que se obtiene porque los instrumentos tienen pocos elementos ópticos y ninguna rendija que atenúe la radiación. Esto lleva a que la potencia radiante que llega al detector es mucho mayor que en un instrumento dispersor, y se observan mucho mayores relaciones señal-ruido. Además, su alta potencia de resolución y la capacidad de reproducción de la longitud de onda, facilita el análisis de espectros complejos en los que el número absoluto de líneas y espectros imbricados dificultan la determinación de las características espectrales individuales. Como tercera ventaja de este instrumento es que todos los elementos de la fuente llegan al detector de manera simultánea. Una diferencia entre la espectroscopía de transformada de Fourier (espectroscopía del dominio del tiempo, cambios en la potencia radiante respecto al tiempo) y la espectroscopía ordinaria (espectroscopía del dominio de la frecuencia), es que todos los elementos de resolución de un espectro se miden de manera simultánea.

Las señales en el dominio del tiempo, no se pueden adquirir en forma experimental con radiación en el intervalo de frecuencias que se asocia con la espectroscopía óptica con frecuencias de 10^{12} a 10^{15} Hz (ver *Figura 2*) porque no hay transductores que respondan a las variaciones de la potencia radiante de estas frecuencias altas. Entonces, un transductor típico produce una señal que corresponde a la potencia promedio de una señal de frecuencia alta y no a su variación periódica. Por este motivo, para obtener señales en el dominio del tiempo se requiere un método de conversión o modulador para transformar una señal de alta frecuencia en una de frecuencia que se pueda medir sin distorsionar las relaciones de tiempo incluidas en la señal (Skoog et al., 2008).

El interferómetro de Michelson (*Figura 2*) se usa ampliamente para modular la radiación en la región óptica. Este dispositivo consta de un haz de radiación proveniente de una fuente, el cual es colimado y choca luego en un divisor de rayos, el cual transmite alrededor de la mitad de la radiación y refleja la otra mitad. Los rayos gemelos resultantes se reflejan luego desde los espejos, uno fijo y el otro móvil. Los rayos se vuelven a reunir

en el divisor de haces, la mitad de cada uno se dirige hacia la muestra y el detector, y las otras dos mitades se regresan a la fuente. Sólo las dos mitades que atraviesan la muestra del detector se usan para fines analíticos (Skoog et al., 2008).

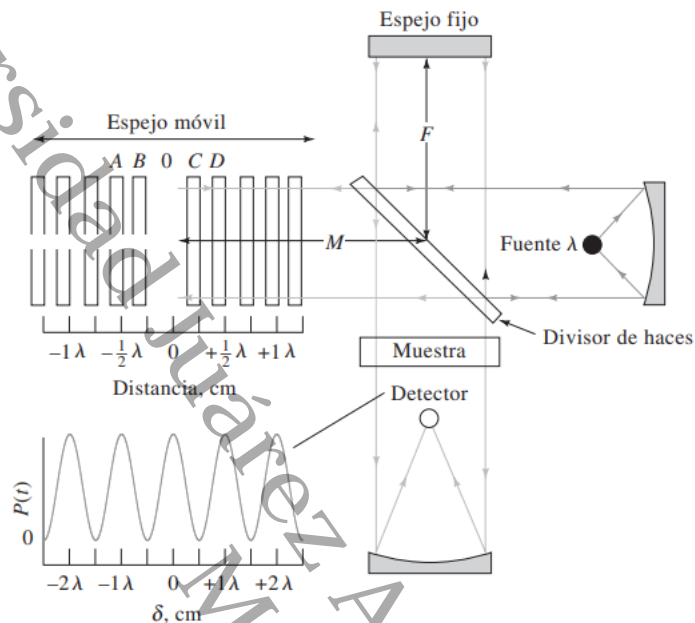


Figura 2. Interferómetro de Michelson iluminado por una fuente monocromática. Tomada de Skoog et al. (2008), pag. 208.

3.11 Espectrometría atómica

La espectroscopía atómica es la técnica más utilizada para la determinación de concentraciones trazas de los elementos en las muestras; la cual, involucra radiación electromagnética que es absorbida y/o emitida por los átomos de la muestra, esta técnica proporciona información significativa cuantitativa (concentración de los elementos) y cualitativa (composición elemental) de la composición elemental de una muestra obtenida al analizar su espectro electromagnético o su espectro de masas (Aguirre, 2015; Cruz Garritz et al., 1986; Jiménez Heinert et al., 2020; Perkin Elmer, 2017). La radiación electromagnética es considerada como ondas de partículas o paquetes discretos de energía conocidos como “fotones o cuantos”, según la dualidad esta consideración (radiación, como partícula y onda) se aplica tanto al flujo de electrones y protones como al de otras partículas elementales (Carbajal & Nolasco, 2011).

Dentro los tipos de espectrometría óptica que proporcionan este tipo información encontramos: emisión de rayos gamma, absorción, emisión, fluorescencia, difracción de rayos X, absorción ultravioleta en el vacío, absorción infrarroja, entre otras (Aguirre, 2015; Cruz et al., 1986; Jiménez et al., 2020; Perkin Elmer, 2017; Skoog et al., 2008).

3.11.1 Fundamento teórico de Emisión Atómica

El modelo atómico de Bohr (*Figura 3*) representa el átomo, el cual está compuesto por un núcleo donde el electrón se encuentra alrededor de éste en un orbital. En este orbital, el electrón tiene un nivel de energía menor y en orbitales más distante al núcleo son de mayor energía. Cuando los electrones de un átomo están en un orbital cercano al núcleo, el átomo se encuentra en su estado más fundamental o basal. Cuando una fuente de energía es agregada al átomo entra el proceso de absorción de la radiación electromagnética o una colisión con otras partículas, llegando al proceso de excitación. Un átomo es considerado menos estable en su estado excitado y decae a un menor estado de excitación, perdiendo energía a través de una colisión con otra partícula o por emisión de fotones que son “partículas” de radiación electromagnética. Finalmente, a través de la pérdida de energía, el electrón retorna a su estado basal (Cina, 2017).

3.11.2 Calibración de métodos instrumentales

Se sabe que un paso muy importante para la ejecución de métodos analíticos es la calibración y estandarización del proceso. Esta tiene como resultado, la relación entre la respuesta analítica y la concentración del analito (Skoog et al., 2008).

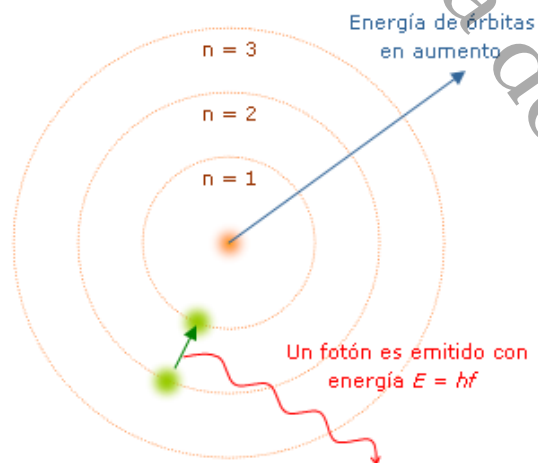


Figura 3. Diagrama de modelo atómico de Bohr. Tomada de sitio web Wikipedia.

Comparación con estándares

Se encuentran dos tipos de comparación, la directa y por titulación. La directa consiste en la comparación de una propiedad del analito con estándares o patrones, tales que la propiedad que se está probando concuerde de manera muy cercana con la del estándar. Y por titulaciones, se refiere a la reacción del analito con un reactivo estandarizado, el titulante, en una reacción de estequiometría conocida. Por lo regular, la cantidad de titulante varía hasta que se alcanza la equivalencia química, según lo indica el cambio del color del indicador químico o el cambio en una respuesta del instrumento (Skoog et al., 2008).

Calibración de un estándar externo

Diversas técnicas analíticas se calibran por medio de estándar o patrón externo, el cual se prepara por separado de la muestra (preparación de una serie de tales estándares externos que contienen el analito en concentraciones conocidas); y otras técnicas utilizan estándar interno, que son añadidas a las muestras (Skoog et al., 2008).

3.12 Espectroscopia de Emisión atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Así pues, según (Rinaldi, 2015) la espectroscopía de emisión Óptica (OES) se basa en la producción y detección de espectros de línea específicos de cada elemento emitidos durante el proceso de desexcitación radiactiva de electrones que sufren transiciones entre niveles excitados superiores y niveles excitados inferiores (nivel fundamental). Esos electrones pertenecen a las órbitas externas de los átomos, adquiriendo el nombre de electrones ópticos. Donde, la fuente de energía para la vaporización, atomización, ionización y excitación de las moléculas que conforman a la muestra es a través del Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) (Gasca Estrada, 2015). Además, cuenta con un sistema dispersivo que permite al analista verificar la presencia de ese elemento y determinar su concentración por medio de los espectros. El ICP-OES se integra por: un sistema de introducción de muestras, una fuente de radiación, un sistema óptico dispersivo, un detector y la correspondiente electrónica para adquisición, procesamiento y edición de resultados (Rinaldi, 2015).

3.12.1 Fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo

La fuente de ICP (*Figura 4*) o llamada antorcha, se forma con un flujo de gas argón con un caudal total comprendido entre 8-20 L/min a través de tres tubos de cuarzo concéntricos (Gasca Estrada, 2015). El diámetro del tubo más grande es aproximadamente de 2.5 cm, rodeando la parte superior de este tubo se encuentra una bobina de inducción de cobre refrigerada por agua, conectada a un generador de radiofrecuencia capaz de producir una potencia de 2 kw a unos 27 MHz (Montaser, 1998). La ionización del argón que fluye se inicia por medio de una chispa que proviene de una bobina Tesla. Los iones resultantes y sus electrones asociados interactúan entonces en el campo magnético oscilante que se produce por la bobina de inducción. Esta interacción hace que los iones y los electrones dentro de la bobina se muevan en trayectorias anulares cerradas (Gasca, 2015; Montaser, 1998).

Las temperaturas del plasma se encuentran de 10 000 a 6 000K, encontrándose la zona más caliente a la altura de la bobina de inducción, donde se genera. En la zona fría es posible que se formen óxidos, que son indeseables. El ICP-OES usa aire seco como barrera física que cortan el plasma para minimizar la probabilidad de formación de óxidos, por donde pasan los iones del plasma al espectrómetro (Montaser, 1998).

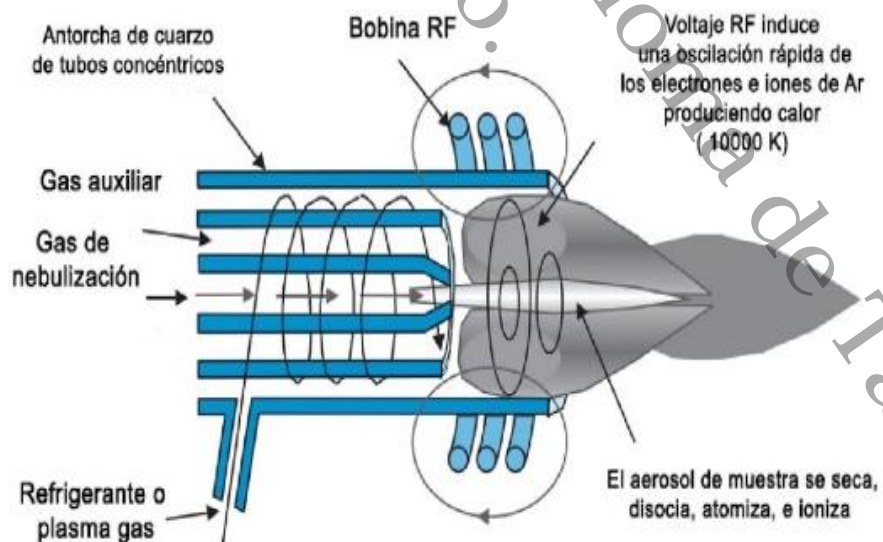


Figura 4. Fuente de plasma acoplada inductivamente. Tomada de Seravalli (2012).

3.12.2 Sistema de introducción de la muestra

En la *Figura 5*, se presenta el sistema compuesto para el proceso de introducción de muestra. Este proceso inicia con la introducción de la muestra acuosa a través de los capilares al sistema de nebulización. Posteriormente entra en función el motor de empuje, conocida como bomba peristáltica que se integra por un riel circular con cilindros de acero inoxidable girando unidireccionalmente. Los capilares se presionan hacia la bomba peristáltica y el giro de los rodillos provoca el desplazamiento de lo contenido en el capilar, esto genera un vacío que provoca la succión continua de la solución para llenar los vacíos.

Después la muestra llega al nebulizador; sale de un capilar y gotea sobre la salida de otro capilar paralelo donde sale un flujo de Ar a alta velocidad, cuando éstos se encuentran el Ar rompe la muestra en gotas de menor tamaño produciendo un aerosol (Gasca Estrada, 2015; Montaser, 1998). Este proceso se realiza para que la muestra por medio del nebulizador sea introducida al plasma, utilizando un flujo transportador de Ar de aproximadamente 1 L/min. Es necesario que la muestra entre como gas, vapor o aerosol, que contienen gotas o partículas sólidas muy pequeñas, entre 8 y 10 μm de diámetro (Rinaldi, 2015).

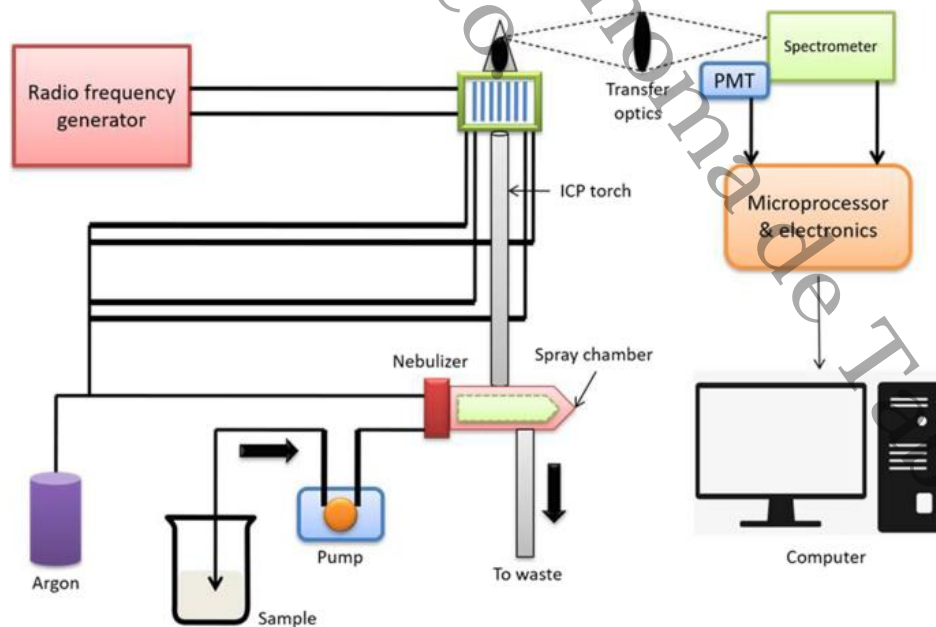


Figura 5. Sistema compuesto para el proceso de introducción de muestra. Tomada de Rinaldi, 2015.

Sin embargo, solo las gotas bajo de un cierto tamaño resultan en completa solvatación, vaporización, atomización, ionización y excitación y producen una considerable población de átomos excitados (*Figura 6*) (Almagro et al., 2007).

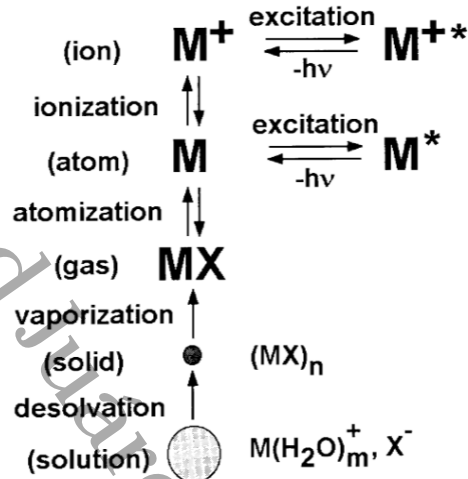


Figura 6. Procesos que toma lugar cuando una muestra es introducida a un ICP. Tomada de Rinaldi, 2015.

Este aerosol es conducido a la zona de ionización, donde los átomos presentes en la muestra son ionizados/excitados. Posteriormente, al volver a su estado fundamental estos iones o átomos excitados emiten radiaciones de una longitud de onda característica de cada elemento. Finalmente, esta radiación pasa a través de un sistema óptico que separa la radiación según su longitud onda para llegar a un detector que mide la intensidad de cada una de las radiaciones. Y es así como se obtiene la concentración de cada elemento en la muestra (Fanego & Carabeo, 2017; Rinaldi, 2015).

3.12.3 Interferencias en técnicas de espectrometría de plasma

Los inconvenientes de estas técnicas son las interferencias espectrales y no espectrales. Las muestras sólidas, como las que se emplearon en este trabajo, deben ser convertidas en disoluciones homogéneas antes del análisis, para evitar interferencias ya que son las principales limitaciones de los ICP-OES (Peña et al., 2019), entre otras limitantes y factores que ocasionan las interferencias.

3.12.3.1 Interferencias espectrales

Estas interferencias están relacionadas con especies que emiten a la misma longitud de onda (ICP-OES/MIP-OES) o tienen la misma relación masa/carga (ICP-MS) que el analito de interés (Torregrosa et al., 2021).

3.12.3.2 Interferencias no espectrales

También conocida como interferencias por efectos de matriz o químicas (Durán Sosa et al., 2014). Se refiere a todo tipo de variaciones de la señal de analito en una determinada matriz en comparación con la que se obtiene en una disolución libre de matriz. Hace referencia a los cambios que produce la matriz y/o los reactivos utilizados durante la preparación de muestra en: la generación y transporte del aerosol; las características del plasma (temperatura, densidad electrónica, etc.), y los mecanismos de atomización, excitación y ionización del analito (Abad Peña, 2018; Torregrosa et al., 2021). Esta es una de las causas fundamentales del deterioro de la exactitud en la determinación de elementos a bajas concentraciones (Peña et al., 2019).

3.13 Validación de métodos analíticos

Los criterios cuantitativos y características de desempeño de los instrumentos se utilizan para decidir si un método instrumental es adecuado para resolver un problema analítico, y son conocidos como parámetro de calidad.

3.13.1 Selectividad

La selectividad analítica se define como el grado en el que un método puede ser utilizado para determinar analitos particulares en mezclas o matrices sin interferencias de otros componentes de comportamiento similar (Morillas et al., 2016).

3.13.2 Linealidad

Se evalúa la linealidad de un método cuando existe una relación directamente proporcional entre la respuesta experimental y la concentración del analito en la matriz dentro del rango de concentraciones del analito buscado. Así mismo, los criterios de aceptación implican una prueba de la "bondad de ajuste". Como criterio de la linealidad, se considera un coeficiente de correlación (r^2) del 0.99. Sin embargo, este criterio no basta para demostrar que existe una relación lineal, por lo que cabe considerar que se

puede utilizar un método que no permita establecer un coeficiente de correlación tan alto como el 0.99 pero que permita cumplir los fines previstos (UNODC, 2010).

3.13.3 Sensibilidad

Se define como una medida de su aptitud para discriminar entre pequeñas diferencias de concentración del analito. Hay dos factores que limitan la sensibilidad: la pendiente de la curva de calibración y la precisión del dispositivo de medición. Esto en otras palabras, de dos métodos que tienen igual precisión, el que tiene la curva de calibración con mayor pendiente será la más sensible. Y en caso contrario, es que si dos métodos tienen curvas de calibración con pendientes iguales, el que muestre la mejor precisión será el más sensible (Sánchez, s/f; Skoog et al., 2008; UNODC, 2010).

3.13.4 Exactitud

La exactitud del método se verifica mediante el análisis de un material de referencia certificado, o comparando los resultados con los resultados obtenidos por otro método confiable sobre la misma muestra. Se representan como el porcentaje de recuperación en un método analítico de una cantidad conocida del analito o como la diferencia entre el valor medio obtenido en la valoración y el valor aceptado como real (Suarez et al., 2009).

3.13.5 Precisión

La precisión de un método analítico es el grado de concordancia entre los resultados de las pruebas individuales cuando se aplica el método repetidamente a múltiples muestreos de una muestra homogénea. Este criterio se expresa como la desviación estándar o la desviación estándar relativa (coeficiente de variación) de una serie de mediciones (Chipana, 2016).

3.13.6 Robustez

El término "robusto", indica las condiciones en que la señal de un análisis, en una dada concentración, no está significativamente afectada por cambios en la composición de la matriz. En este sentido, la matriz consiste en especies químicas principales de demostración, reactivos utilizados, tanto ácidos inorgánicos y solventes orgánicos (Ciudad, 2011).

3.13.7 Repetibilidad

Se define como la realización del procedimiento analítico en un laboratorio durante un periodo de tiempo corto realizado por el mismo analista con el mismo equipo (Chipana, 2016; United States Pharmacopeial Convention Inc., 2015).

3.13.8 Intervalo dinámico

Este intervalo se extiende desde la concentración mínima a la cual se pueden efectuar mediciones cuantitativas (límite de cuantificación o LOQ por sus siglas en inglés) hasta la concentración a la cual la curva de calibración se desvía de la linealidad por una cantidad especificada (límite de linealidad o LOL por sus siglas en inglés) (Morillas et al., 2016; Skoog et al., 2008).

Límite de detección (LOD)

Los límites de detección se expresan como 3 veces el desvío estándar de la señal de fondo de las medidas repetitivas sobre un blanco a la longitud de onda analítica de cada elemento de interés (Servant et al., 2010).

Límite de cuantificación (LOQ)

El límite inferior de las medidas cuantitativas es igual a 10 veces la desviación estándar de las medidas repetitivas realizadas sobre un blanco a la longitud de onda analítica de cada elemento de interés (Servant et al., 2010).

Intervalo lineal

Dentro del intervalo lineal, la señal de respuesta tendrá una relación lineal con la concentración del analito o del valor de la propiedad relacionada. La extensión de este intervalo puede establecerse durante la evaluación del intervalo de trabajo (Morales, 2015).

CAPÍTULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Ubicación del área de estudio

El municipio de Cunduacán del estado de Tabasco, se encuentra geográficamente entre los paralelos 17°56' y 18°14' de latitud norte; los meridianos 93°01' y 93°25' de longitud oeste; altitud entre 0 y 100 m. Colinda al norte con los municipios de Comalcalco y Jalpa de Méndez; al este con los municipios de Jalpa de Méndez, Nacajuca y Centro; al sur con los municipios de Centro, Cárdenas y el estado de Chiapas; al oeste con los municipios de Cárdenas y Comalcalco (ver en *Figura 7*). Las zonas de estudio están representadas por los polígonos 1, 2 y 3 en la *Figura 7*.

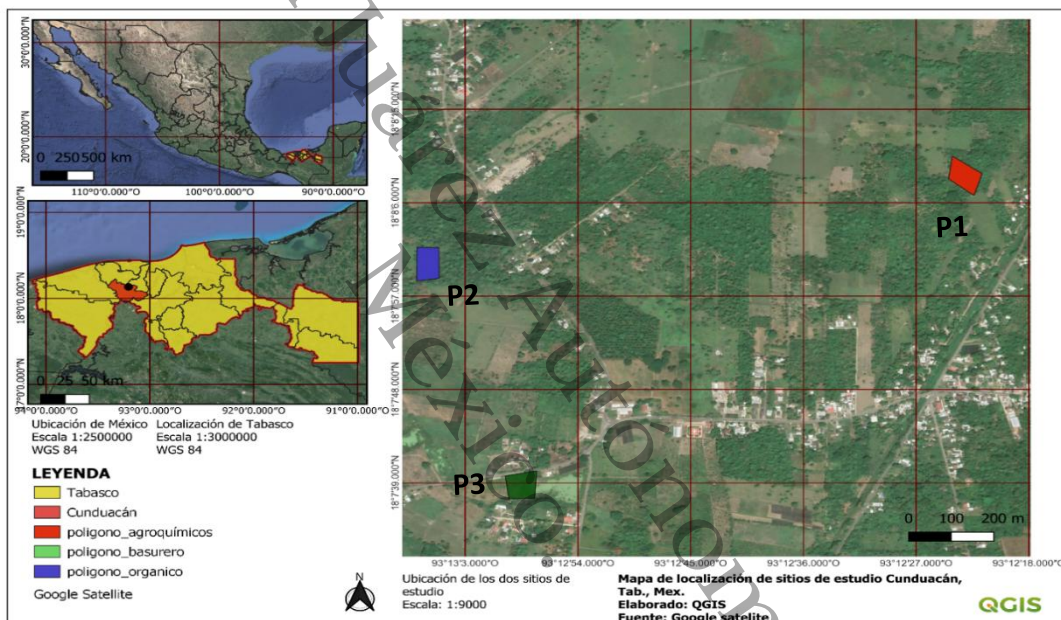


Figura 7. Mapa de localización de las áreas de estudio con diferente tratamiento de suelo. Diseño propio.

4.2 Metodología

En la *Figura 8*, se muestra un esquema general de la metodología que se llevó a cabo del trabajo. Se indican los tipos de análisis que se realizaron, las normas utilizadas y sus respectivas técnicas analíticas para el diagnóstico de las condiciones del suelo. Todos los resultados fueron analizados estadísticamente utilizando la prueba de normalidad Shapiro Wilks (Valor crítico o VC vs Valor estadístico o SWc, con un nivel de significancia del 5 %), la prueba Anova (valor p, $\alpha = 0.05$) y la prueba de Tukey (diferencia

honestamente significativa o HSD), todas utilizando el software estadístico STATGRAPHICS Centurion.

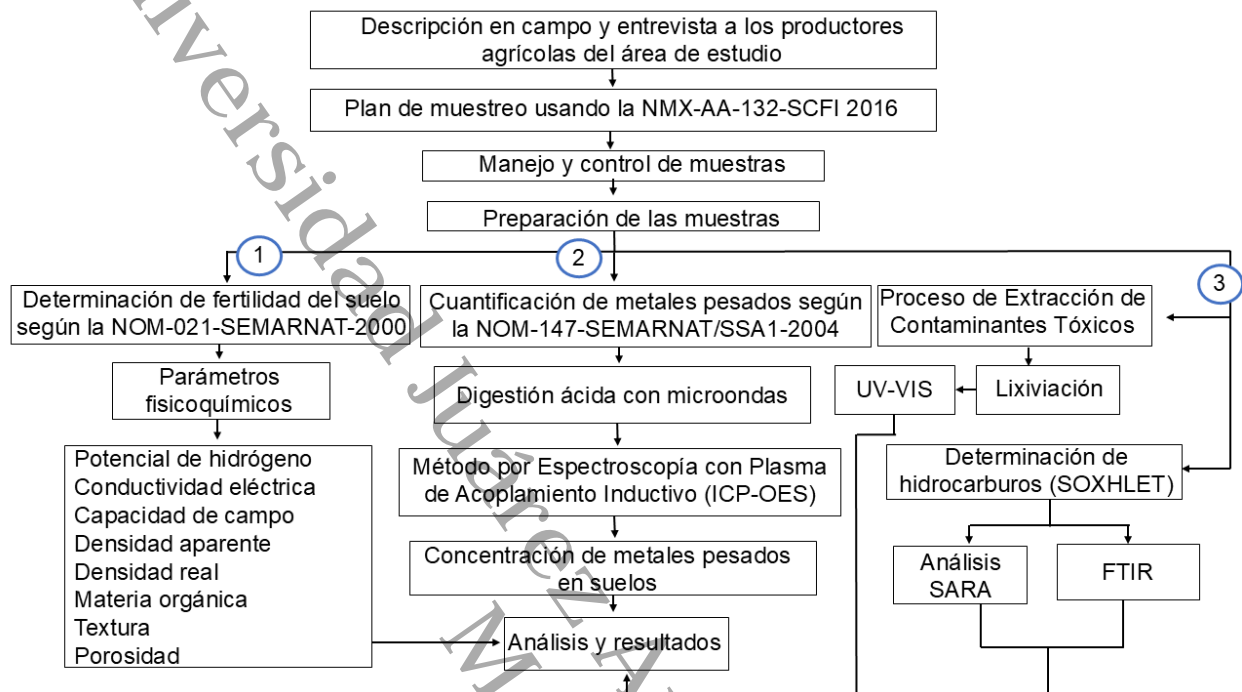


Figura 8. Metodología de investigación. Diseño propio.

4.2.1 Elaboración de cartografía base y caracterización de la zona de estudio

Edafología y uso de suelo

Primero, se descargaron los mapas de edafología (INIFAP & CONABIO, 2008), uso de suelo (INEGI, 2013) y el Modelo Digital de Elevación (MDE) (INEGI, s/f). Posteriormente, en el programa Google Earth Pro se generaron los polígonos 1, 2 y 3 pertenecientes al municipio de Cunduacán, para obtener su georreferenciación y coordenadas. Definida el área de estudio y los datos del sitio, en el Software Qgis Desktop 3.26.3, se delimitó la capa vectorial del MDE, edafología y uso de suelo del estado de Tabasco como primer producto. Para esta práctica en particular se hizo un recorte estableciendo como base la capa vectorial del municipio de Cunduacán. Seguidamente, se realizó el proceso para generar el mapa de curvas de nivel con intervalo entre curvas de 1 metro. Finalmente, se elaboró un mapa de pendiente, este como segundo producto derivado de MDE (Rivas & Escuintla, 2021).

4.2.2 Plan de muestreo y toma de muestra

Para llevar a cabo el muestreo de suelo y su transporte al laboratorio, se utilizaron los materiales que se enlistan en la *Tabla 5*:

Tabla 5. Materiales y sustancias químicas que se utilizaron durante la toma de muestras.

Materiales	Sustancias químicas
Pala recta inoxidable Bolsas de polietileno Cadena de custodia Libreta de campo y bolígrafo Etiquetas, cinta métrica y adhesiva Balanza Pipetas Recipientes Caba hoyos Marcadores de tinta indeleble Fotografía aérea del área Espátula de cuchilla de acero inoxidable Charolas de plástico Frascos de vidrio Botiquín de primeros auxilios Flexómetro GPS	Agua desionizada Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) Ácido nítrico (HNO_3)

4.2.2.1 Plan de muestreo usando la NMX-AA-132-SCFI-2016

El propósito de este estudio fue conocer las concentraciones de MP y su relación con el análisis de fertilidad del suelo con sus propiedades físicas y químicas para obtener un diagnóstico de los sitios de interés. Para ello, se realizó una visita de campo para estudios preliminares y pre-muestreo para determinar si las condiciones eran favorables para iniciar la recolección y elegir los puntos de muestreo, así como las entrevistas a los productores agrícolas del área de estudio para el conocimiento de la historia del

tratamiento del terreno y cultivo, datos como fórmula comercial de los agroquímicos usados y de la fertilización edáfica o foliar, dosis aplicadas, época de aplicación, manejo en general del suelo y del cultivo, rendimientos promedios del cultivo, características climáticas y de relieve de la zona. Se desarrolló esta planeación en los campos de cultivo de cacao y en el tiradero de RSU en Piedra 2da. perteneciente al municipio de Cunduacán, Tabasco, México.

El método establecido por la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 para la distribución de los puntos de muestreo (Figura 9) fue puntual y dirigido, y permitió establecer que el número de muestras a extraer en una superficie de 0.5 hectárea es de 6, donde se tomaron muestras representativas de cada horizonte hasta el nivel freático y sus perfiles edáficos correspondientes (SEMARNAT, 2016).

La Figura 9, muestra la distribución de los puntos de muestreo y los perfiles edáficos aleatorios de reconocimiento de campo aplicados para los sitios de uso agrícola.

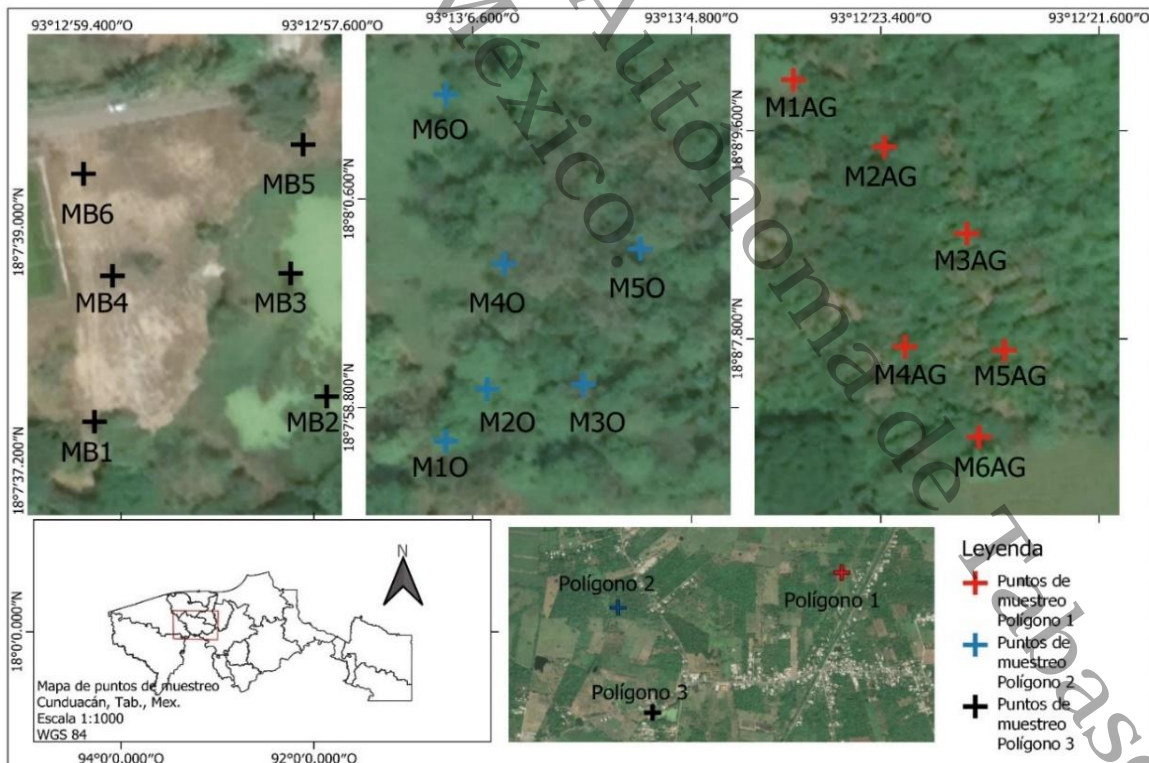


Figura 9. Mapa de distribución de puntos de muestreo. Diseño propio.

En la *Tabla 6*, se presentan las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo y perfiles edáficos de los dos sitios con diferente tratamiento agrícola y del tiradero de Residuos Sólidos Urbanos (TRSU).

4.2.2.2 Manejo y control de muestras según la NMX-AA-132-SCFI-2016

Se usaron bolsas de polietileno para contener las muestras, los sellos se colocaron de manera que garantizaba su inviolabilidad. Una vez envasadas, etiquetadas y selladas al momento de su recolección, las muestras fueron llevadas al laboratorio para realizarles un pretratamiento para medir las propiedades fisicoquímicas de todas las muestras y cuantificación de MP, y solo para las muestras del TRSU se determinaron los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) y sus fracciones SARA. Durante la recolección en campo se realizaron anotaciones de la biota (actividad biológica, flora, fauna), así como condiciones climatológicas y textura al tacto. Además, se estimó el grado de descomposición y humificación de la turba, también se consideró color y moteas del suelo, material antropogénico, entre otros (Vargas, 2009).

Tabla 6. Coordenadas de puntos de muestreos y perfiles edáficos.

P1: Área tratada con agroquímicos		P2: Área tratada con orgánicos		P3: Tiradero de RSU	
Coordenadas de Puntos de muestreo y perfiles edáficos					
18°8'10.04"N	93°12'24.12"O	18° 7'58.51"N	93°13'6.82"O	18° 7'37.57"N	93°12'59.31"O
18°8'9.46"N	93°12'23.37"O	18° 7'59.00"N	93°13'5.69"O	18° 7'37.76"N	93°12'57.64"O
18°8'8.71"N	93°12'22.69"O	18° 7'58.96"N	93°13'6.48"O	18° 7'38.69"N	93°12'57.90"O
18°8'7.73"N	93°12'23.20"O	18° 8'0.04"N	93°13'6.34"O	18° 7'38.67"N	93°12'59.18"O
18°8'7.70"N	93°12'22.38"O	18° 8'0.17"N	93°13'5.22"O	18° 7'39.44"N	93°12'59.39"O
18°8'6.95"N	93°12'22.59"O	18° 8'1.50"N	93°13'6.82"O	18° 7'39.66"N	93°12'57.81"O

4.2.2.3 Pretratamiento de las muestras en laboratorio

Se procedió a secar las muestras a temperatura ambiente extendidas sobre bolsas de polietileno para facilitar el manejo, control, inviolabilidad y homogeneización. Se retiraron las fracciones gruesas como piedras, hierbas secas, residuos antropogénicos que no se

retiraron en campo. Posteriormente, se disgregaron las muestras manualmente con un rodillo de madera y se pasó por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro de acero inoxidable (tamiz con maya de nylon). Luego, se colectaron las partículas finas que pasaron por el cribado. Por último, se realizó el homogeneizado y partición por cuarteo para asegurar que la muestra representaba la composición y la granulometría del suelo, y que los análisis se realizaran en muestras características del suelo recolectado en el campo.

4.2.3 Determinación de fertilidad del suelo

A cada una de las muestras, se le realizó la determinación de los siguientes parámetros:

- a) Potencial de hidrógeno (pH), método AS-02/NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). Relación suelo-agua 1:2, potenciómetro HANNA HI 9813-6
- b) Conductividad eléctrica (CE), relación suelo-agua 1:2, conductímetro HANNA HI 9813-6
- c) Porcentaje de saturación o capacidad de campo (CC), método por gravimetría AS-05/NOM-021-SEMARNAT-2000
- d) Densidad real (DR), método AS-04/NOM-021-SEMARNAT-2000
- e) Densidad aparente (DA), método AS-03/NOM-021-SEMARNAT-2000
- f) Porosidad (PO), $((DR-DA) / DR) * 100$ (Palma-López, 2007)
- g) Materia orgánica (MO), oxidación con H_2O_2 (Solís Pérez et al., 2019)
- h) Textura por el procedimiento de Bouyoucos, método AS-09/NOM-021-SEMARNAT-2000
- i) Micronutrientes: método de extracción y digestión de muestras normativo B.2.3/NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004; cuantificación de concentración, método normativo B.4/ NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004
- j) Capacidad de intercambio catiónico (CIC), método de extracción y digestión de muestras normativo B.2.3/NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004; cuantificación de concentración por método normativo B.4/ NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

4.2.4 Evaluación de contaminantes tóxicos y lixiviación en muestras de suelo del tiradero de residuos sólidos urbanos

a) Evaluación de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) presentes en la zona a través de las fracciones SARA

Los HTP se determinaron mediante el método de extracción continua sólido-líquido, utilizando un equipo Soxhlet en 5 g de suelo y 90 mL de diclorometano durante 6 horas (Martínez et al., 2017). Las fracciones SARA se determinaron con este mismo método, equipo y tiempo de extracción, pero variando los solventes de extracción según la fracción a determinar (Marín et al., 2016). Los solventes adecuados para extraer las fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos) que componen al hidrocarburo presente en las muestras de suelo, se muestran en la *Tabla 7*. Este análisis SARA, separa la muestra en compuestos mediante la acción de solventes n-alcános, tolueno y diclorometano, y la interacción del aceite con una fase estacionaria (Meléndez et al., 2012).

Tabla 7. Solventes selectivos utilizados para la extracción de las fracciones SARA.

Solvente	Fracción
Diclorometano	Asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados
Hexano	Resinas
Cetona	Aromáticos
Tolueno	Saturados

Posteriormente se realizó la prueba WDPT, por sus siglas en inglés “Water Drop Penetration Time”, propuesto por (Dekker & Ritsema, 1994) y las gráficas de Marín-García et al. (2016). Esto siguiendo la metodología propuesta por (Jaramillo, 2006).

b) Contenido de componentes polares por Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Los extractos de HTP fueron analizados por la técnica de FTIR en un equipo modelo Nicole is50 ZNSE con detector ID7 Air Diamond de la marca Thermo Scientific, operado

con el Software Omnic Spectra servicio Falcón; esto se usó para determinar índices de compuestos polares o IRAP (Guzmán et al., 2020).

c) Lixiviados en extractos obtenidos en con el Proceso de Extracción de Contaminantes Tóxicos (PECT)

Se realizó el proceso de extracción líquido-líquido de los contaminantes tóxicos para obtener los lixiviados siguiendo la metodología especificada por la Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 (1993). Estos extractos fueron analizados por la técnica espectrofotométrica Ultravioleta Visible en un equipo con marca Thermo Scientific modelo Genesys 10 UV. Posteriormente, los resultados fueron utilizados para obtener la concentración (mg/L) de los contaminantes tóxicos en el suelo según los modelos de calibración para la cuantificación espectrofotométrica propuestos por Arguijo-Portillo et al. (2019) y comparados con el límite permisible por la norma oficial mexicana NOM-143-SEMARNAT (SEMARNAT, 2003).

4.2.5 Cuantificación de metales por medio de Espectroscopía con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)

Para realizar la lectura de las concentraciones de los analíticos en las muestras de suelo, se realizó digestión ácida, la preparación de la adición de los estándares de calibración y la selección del material de referencia certificado.

4.2.5.1 Digestión ácida en horno de microondas

Se realizó una digestión por extracción en 0.5 g de muestras de suelo, utilizando 3 mL de HCl (71.30 %, J.T. Baker) y 9 mL de HNO₃ (65.80 %, J.T. Baker) según las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA-1-2004 (SEMARNAT, 2004). La digestión se realizó en un horno de microondas MLS-1200 MEGA (Milestone) durante 20 min, que es el tiempo recomendado por el fabricante para la matriz analizada según el manual (*Tabla 8*) que viene integrado con este. El equipo utilizado cuenta con un carrusel para 6 muestras y 6 reactores con válvulas de precisión, donde fueron colocados los reactivos con las muestras y los blancos para su digestión. Después, la muestra digerida se colocó en tubos de centrifuga diluyéndolo en 45 mL con agua desionizada, se dejaron sedimentar por 24 h para su lectura en el equipo de ICP-OES.

4.2.5.2 Análisis de las muestras por ICP-OES

El análisis se realizó en un equipo ICP-OES Perkin Elmer Optima Avio 500, contando con su Software de operación Syngistix. Antes que se realizaran las pruebas de optimización y análisis de las muestras digeridas, se verificó la limpieza del equipo, perfecta conexión a la corriente eléctrica y la precisión requerida de los gases en el manómetro. Utiliza gas de argón de alta pureza (80-120 psi), nitrógeno (30-120 psi) y aire limpio y seco (80-120 PSI). Se procedió a encender el recirculador, el extractor y el equipo; posteriormente se abrió el programa en el computador y se esperó a que el detector del equipo tipo SCD se estabilizará a una temperatura de -40 °C.

Además, se revisó la integridad y dirección de las mangueras de la bomba peristáltica, capilares para las muestras y desechos, el nebulizador, cámara ciclónica, inyector de alúmina, antorcha y bonete. En la sección de calibración en el software se definió las características de los estándares, concentración, unidades y ecuación de calibración.

Tabla 8. Programa de digestión propuesto por el manual de aplicaciones del horno de microondas.

Muestras típicas	Silicatos, rocas, escorias, minerales, cenizas volátiles, óxidos, cerámicas, cuarzos, vidrios		
Peso de las muestras	<ul style="list-style-type: none"> Hasta 2.0 g 		
Muestras	Silicatos: vidrio, cuarzo, rocas		
Reactivos	HNO ₃ (65 %) de 2 a 4 mL dependiendo del peso de la muestra		
	HF (48 %) de 0.5 a 2.0 mL dependiendo del peso de la muestra		
Muestras	Silicatos estables		
Reactivos	H ₂ SO ₄ (96 %) de 2 a 4 mL dependiendo del peso de la muestra		
	HF (48 %) de 0.5 a 2 mL dependiendo del peso de la muestra o si requieren temperatura más alta: NH ₄ F de 100 mg a 500 mg para evitar dilución de la solución		
Unidad de microondas	MLS-1200 MEGA		
Tipo de rotor	MDR 1000/6/100/110 (6 vasos de 100 mL)		
Programa de digestión	1er paso	2do paso	3er paso
	250 W	400 W	500 W
	5 min	5 min	10 min

4.2.5.3 Preparación de estándares de calibración para ICP-OES

La calibración se realizó de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del equipo mediante adición de estándares multielementales S7A (Quality Control Standard, TruQ) y S21 (Quality Control Standard, TruQ) y agua desionizada ASTM Tipo 1. Se usaron matraces volumétricos de 50, 100, 500 y 1000 mL para la preparación estándares para las curvas de calibración de 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 y 10.0 ppm; así mismo, se realizó el cálculo correspondiente de la alícuota de los estándares patrón que se agregó en cada concentración. Después de la alineación y optimización del equipo se prosiguió a realizar el análisis químico de las muestras digeridas; primero se analizó la medición del blanco (agua desionizada) y de los estándares a las concentraciones antes mencionadas. Además, como control de calidad se realizó la lectura del blanco y del estándar de 0.5 ppm cada 15 muestras. Posteriormente, se lavó el sistema con la solución de blanco de agua (desionizada) por 1 min entre cada una de las lecturas de las muestras. Finalmente, se realizó la lectura de blanco de agua, UDA (Universal Data Acquisition) y aire, para el control de la calidad del medio.

4.2.5.4 Material de referencia

Cabe mencionar que se usó como simulación de la matriz, suelo certificado Montana I por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de E.U.A. (National Institute of Standards and Technology, 2018) para el cálculo del porcentaje de recuperación durante la digestión ácida.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Mapeos de las zonas de estudio

Como primer resultado, se obtuvo el mapa de edafología y uso de suelo que comprende a las áreas de estudio (*Figuras 10 y 11*) por medio de la información y mapas que proporciona INIFAP y CONABIO (2008), INEGI (2010 y 2013).

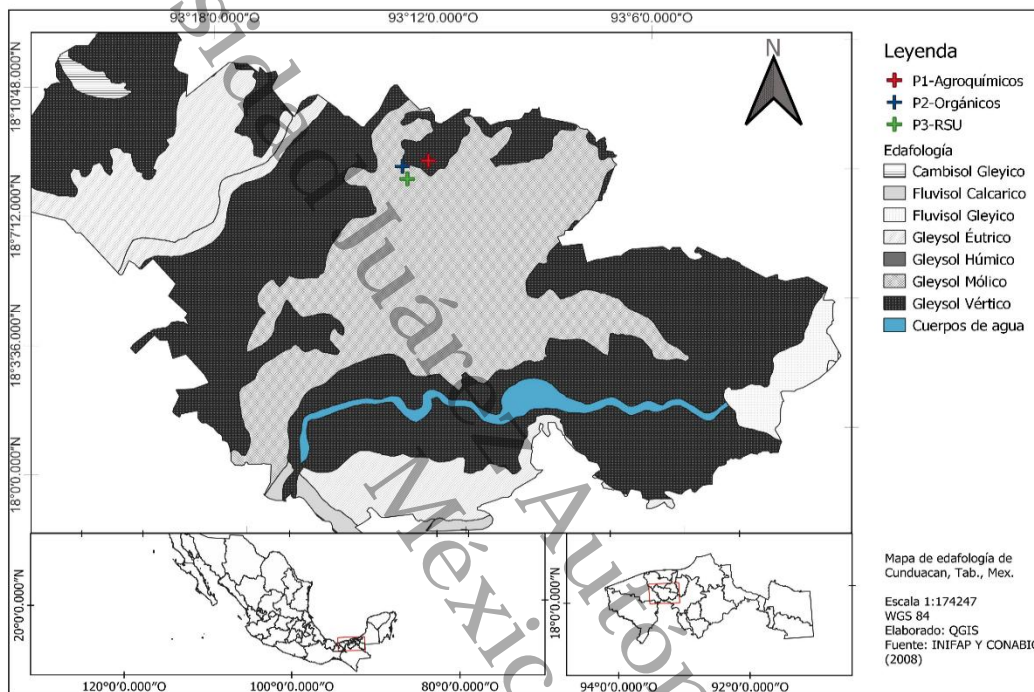


Figura 10. Edafología para el municipio de Cunduacán. Diseño propio.

En la *Figura 10*, se observa que el área que integra a los tres polígonos de estudio se encuentra dentro de la clasificación de edafología de *Gleysol-Mólico* y *Gleysol-Vértico*, y el uso de suelo (*Figura 11*) corresponde a agricultura de temporal y permanente.

Se realizó un MDE para una representación visual de las áreas de estudio y la topografía con base a la altura sobre el nivel del mar (*Figura 12*), muestra que los sitios tratados con productos orgánicos y químicos se encuentran en zonas más bajas e inundables, estos pueden ser afectados por los flujos de agua de escorrentía y subterráneos provenientes de las zonas más altas. Por otra parte, el tiradero a cielo abierto de RSU se encuentra con una elevación topográfica mayor en comparación con las áreas antes mencionadas.

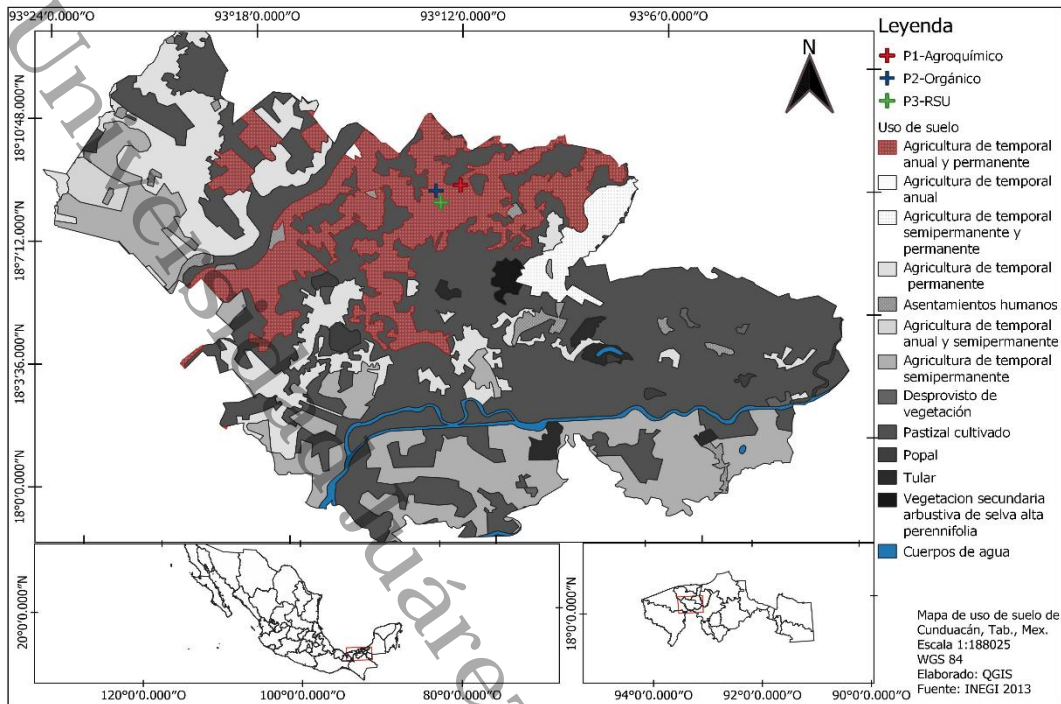


Figura 11. Uso de suelo para el municipio de Cunduacán. Diseñp propio.

Con base a lo observado en la Figura 12, se presenta una mayor zona de acumulación del polígono 3 hacia el polígono 2 por el arrastre de efluentes de agua provenientes de las áreas de mayor elevación topográfica. Por tanto, se plantea que la zona de mayor acumulación de contaminantes serían las zonas más bajas por el drenaje y zonas de inundación (Bravo, 2007).

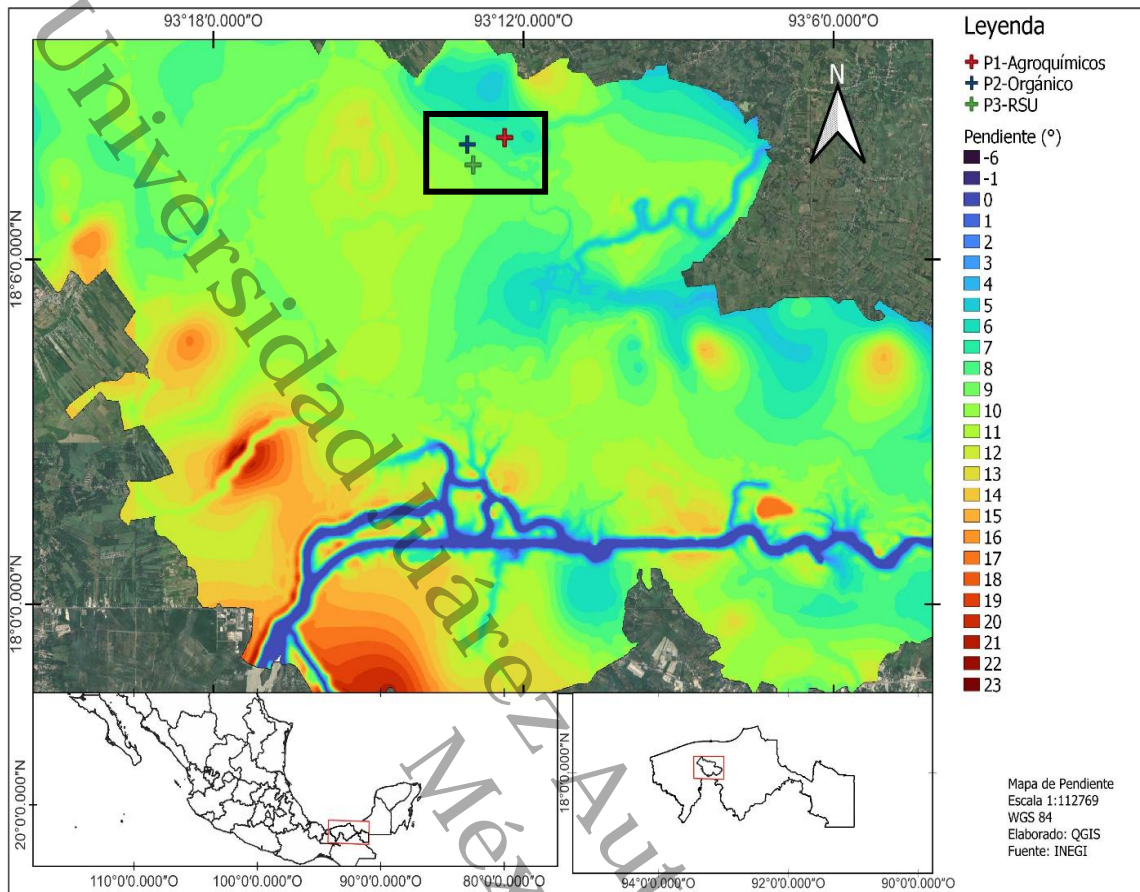


Figura 12. Mapa de elevación topográfica para los sitios de estudio. Diseño propio.

5.2 Clasificación de los suelos

El área de estudio se clasificó en 3 polígonos, en cada polígono se tomaron 12 muestras por polígono identificadas de la siguiente manera:

Polígono(P1)		Polígono(P2)		Polígono(P3)	
ID	Muestra	ID	Muestra	ID	Muestra
1	M1AGH1	13	M1OH1	25	MB1H1
2	M1AGH2	14	M1OH2	26	MB1H2
3	M2AGH1	15	M2OH1	27	MB2H1
4	M2AGH2	16	M2OH2	28	MB2H2
5	M3AGH1	17	M3OH1	29	MB3H1
6	M3AGH2	18	M3OH2	30	MB3H2
7	M4AGH1	19	M4OH1	31	MB4H1
8	M4AGH2	20	M4OH2	32	MB4H2
9	M5AGH1	21	M5OH1	33	MB5H1
10	M5AGH2	22	M5OH2	34	MB5H2
11	M6AGH1	23	M6OH1	35	MB6H1
12	M6AGH2	24	M6OH2	36	MB6H2

M= muestra, AG= Agroquímicos, H= Horizonte, O= Orgánico, B=Basurero

La estimación de las clases texturales en campo, a través de pruebas simples al tacto realizadas a las muestras de suelo de los perfiles edáficos y usando la clasificación de FAO (2009), se muestran en la *Figura 13*. En términos texturales, las muestras representativas de M1AGH1, M2AGH1, M2AGH2, M5AGH1 son *limo-arcillosas* y las muestras M1AGH2, M3AGH1, M3AGH2, M4AGH1, M4AGH2, M5AGH2, M6AGH1 y M6AGH2 son *arcillosas*.

También, se comparó el color base del suelo en seco con la tabla de colores de suelo de Munsell (Munsell Color (Firm), 2010), y se obtuvieron que las muestras M1AGH1, M2AGH1, M3AGH1, M4AGH1, M5AGH1 y M6AGH1 tienen el color *grayish brown* (10 YR 5/2); y para las muestras M1AGH2, M2AGH2, M3AGH2, M4AGH2, M5AGH2 y M6AGH2 son color *pale brown* (10 YR 6/3). De esta misma forma, se establecieron los colores de las moteas presentes en los horizontes de los perfiles. Se observó que en los horizontes M1AGH1, M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M3AGH2, M5AGH2 y M6AGH1 tenían moteados en color *reddish yellow* (7.5 YR 6/8); M3AGH1, M5AGH1 moteas en color *reddish black* (2.5 YR 2.5/1); M4AGH1, M4AGH2 y M6AGH2 de color *brownish yellow* (10 YR 6/6).

Además, se determinó la abundancia y grosor de las raíces usando la clasificación de FAO (2009), donde las muestras M1AGH1, M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M3AGH2, M4AGH2, M5AGH2, M6AGH2 se encontraron raíces muy finas (VF) y poco abundantes (V); M3AGH1 y M5AGH1 muy finas (VF) y abundancia común (C); M4AGH1 raíces finas (F) y muy poco abundantes (V); M4AGH2, M6AGH1 y M6AGH2 medianas (M) y muy pocas (V). Así mismo, se realizó la prueba de reactividad con el H₂O₂, clasificándose una reacción de mediana a alta en todos los perfiles y sus horizontes, muy baja para CH₃COOH y HCl. Lo cual indica bajo contenido de materia orgánica y la ausencia de carbonatos (Van, 1999).

Esto coincide con lo observado en todos los puntos de muestreo y los perfiles edáficos, ya que a pesar de que se integraban grandes cantidades de hojarasca, tenían poca actividad biológica y grietas del suelo durante la temporada de sequía. Según Palma- et al. (2007), el tipo de suelo que integra los perfiles corresponde a *vertisol* por sus características en ser poco manejable, muy duro y grandes fracturas durante temporada

de sequía. No obstante, aunque la carta edafológica del INIFAP & CON0ABIO (2008), establece al sitio como suelos *gleysol-vértico* pero las características observadas en campo se asemejan más a la de un *vertisol* ya que tienen baja saturación y alta CIC (>50 cmol/kg).

Cabe resaltar que en este polígono (*Figura 13*) se utilizan productos químicos, y por las características observadas en campo, se presenta bajo índice de infiltración, alta capacidad de retención de agua y alta escorrentía potencial. Por lo tanto, el cultivo de “*Theobroma cacao L.*” pueden ser afectados por el exceso de lluvia y retención de contaminantes en la capa superficial del suelo (Díaz et al., 2013).

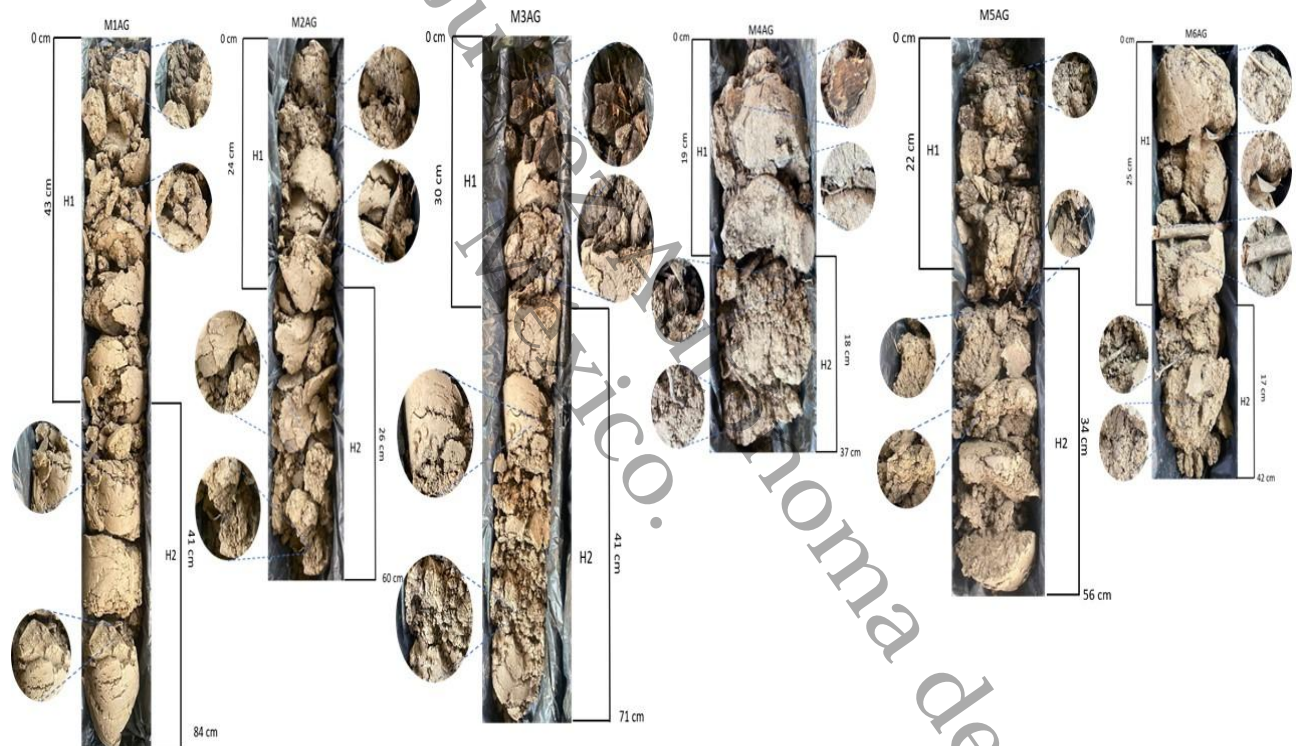


Figura 13. Perfiles edafológicos del Polígono 1 (Tratamiento de suelo con productos agroquímicos). Diseño propio.

La clase textural de las muestras de la *Figura 14* según la literatura (FAO, 2009), para M1OH1, M1OH2, M2OH1, M2OH2, M3OH1, M3OH2, M5OH1, M5OH2, M6OH1 y M6OH2 corresponden a *arcillosas*; y solo las muestras M4OH1 y M4OH2 tienen una textura *limo-arcillosas*. Así mismo, se comparó el color de suelos con la literatura (Munsell Color

(Firm), 2010). Por lo tanto, las muestras M1OH1, M2OH1, M3OH2, M4OH1, M5OH1 son color *grayish brown* (10 YR 5/2); M1OH2, M2OH2, M3OH1, M4OH2, M5OH2 y M6OH2 son *pale brown* (10 YR 6/3); y M6OH1 es *dark grayish brown* (10 YR 4/2).

Además, se establecieron los colores de las moteas presentes en los perfiles los cuales tienen: M1OH1, M3OH1, M4OH2 color *reddish yellow* (7.5 YR 6/8); M1OH2 y M3OH2 color *brownish yellow* (10 YR 6/6); M2OH1, M4OH1, M5OH1 y M6OH1 en *light yellowish brown* (10 YR 6/4); M2OH2 y M6OH2 color *yellowish brown* (10 YR 5/8); y M5OH2 en color *grayish brown* (10 YR 5/2). De igual manera se realizó la clasificación y abundancia de las raíces en los horizontes (FAO, 2009) en donde los horizontes M1OH1, M3OH2, M4OH2 se encontraron raíces finas (F) y muy poca abundancia (V); y en M1OH2, M2OH1, M2OH2, M3OH1, M4OH1, M4OH2, M5OH1 y M5OH2, M6OH1 y M6OH2 se observaron muy finas (VF) y muy pocas (V).

Sin embargo, se observó alta actividad biológica en la mayoría de los perfiles, alta cantidad de hojarasca, baja a mediana reactividad con H₂O₂, nula a muy baja con CH₃COOH y con HCl reactividad nula. Lo cual indica que se integra por baja cantidad en materia orgánica y carece de carbonatos (Van, 1999; Vargas, 2009). Finalmente, comparando con Palma et al. (2007) por sus características para este conjunto de perfiles, descripción en campo y análisis corresponde a suelo de tipo *gleysol-mólico*.

Por lo que se refiere a la clasificación textural de los perfiles de la *Figura 15* (FAO, 2009) los horizontes: MB1H1, MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H1, MB3H2, MB5H1 y MB6H1 presentan textura *arenosa* al tacto; MB4H1 y MB6H2 son *arcillosos*; MB4H2, MB5H2 son *areno-limosos*. Por lo que se refiere a el color base del suelo comparando con la literatura (Munsell Color (Firm), 2010), se tiene que las muestras: MB1H1, MB1H2, MB3H1, MB3H2, MB5H2 y MB6H2 es *gray* (5 YR 5/1); MB2H1, MB2H2, MB5H1 son color *pinkish gray* (7.5 YR 6/2); para MB4H1 es *light brown* (7.5 YR 6/3); para MB4H2 es *brown* (7.5 YR 5/2) y por último, MB6H1 es *pale brown* (10 YR 6/3). Asimismo, no se encontraron moteados en los horizontes.

Por otra parte, se observó que la transición de un horizonte a otro es gradual en todos los perfiles, con la presencia de escasas grietas durante el periodo de sequía y un olor pronunciado a residuos de aceites, plásticos y objetos en estado de descomposición y

oxidación. Además, en todos los horizontes se encontraron residuos sólidos urbanos (material de relleno), nula actividad biológica, no se observó residuos de materia orgánica, raíces y hojarascas. Sin embargo, la reactividad fue nula con H_2O_2 , CH_3COOH y con HCl debido a la ausencia de materia orgánica y carbonatos (Van, 1999; Vargas, 2009). Por último, contrastando con la descripción de Palma et al. (2007) con la descripción de campo y el análisis este suelo es de tipo arenosol, aunque la información edafológica del INIFAP & CONABIO (2008) establece al sitio con suelos *gleysol-mólico*.

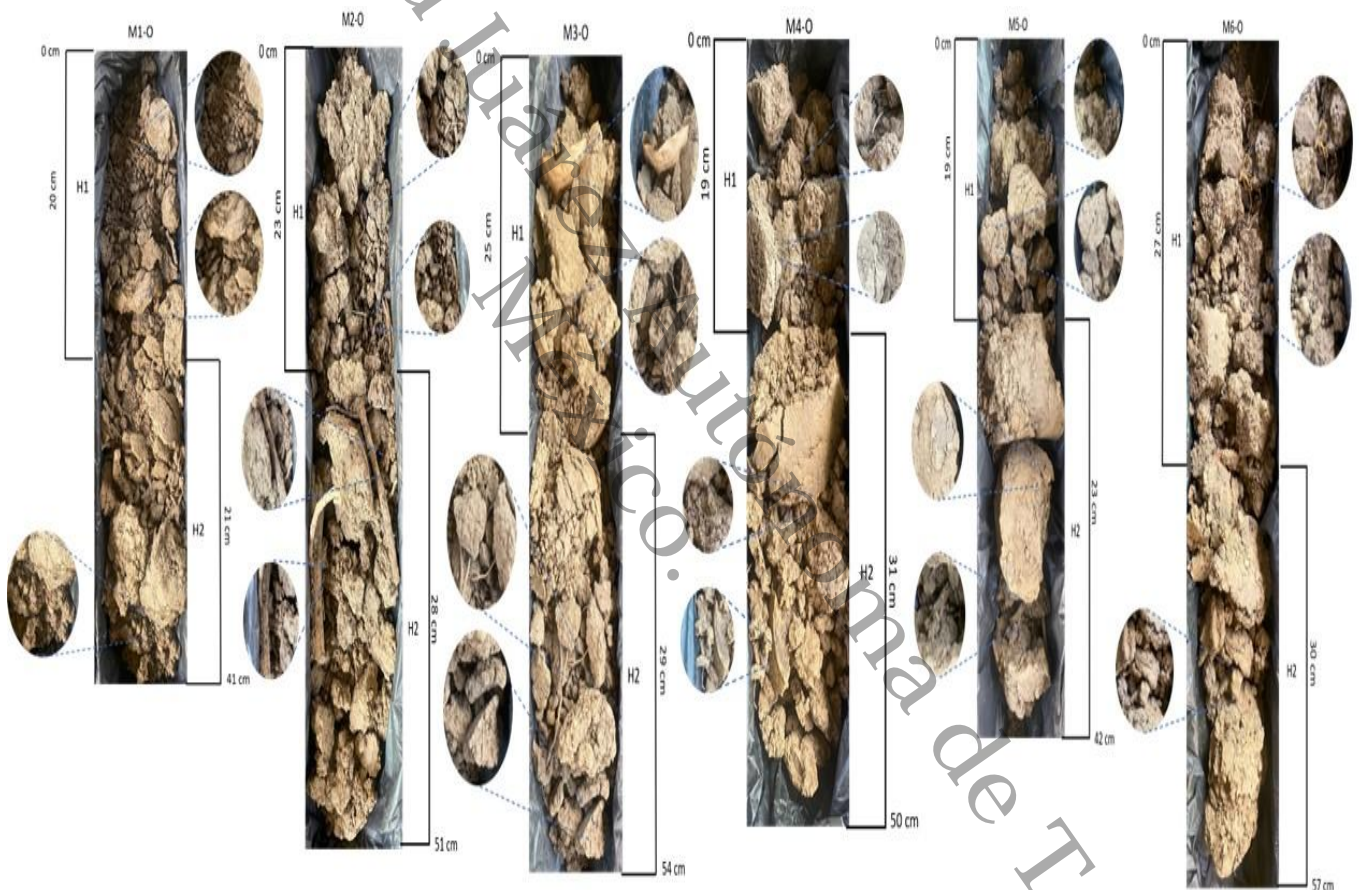


Figura 14. Perfiles edafológicos del Polígono 2 (Tratamiento de suelos con productos orgánicos). Diseño propio.

A partir de la descripción y análisis en campo de los horizontes de los perfiles de suelo y con base a las referencias (Palma et al., 2007; Palma et al., 2017; Zavala et al., 2016), se logró caracterizar y determinar qué tipo de suelo constituyen a los polígonos de

estudio; además, se realizó un perfil de topográfico obtenido de las curvas de nivel del MDE (Figura 16).



Figura 15. Perfiles edafológicos del Polígono 3 (Tiradero de Residuos Sólidos Urbanos). Diseño propio.

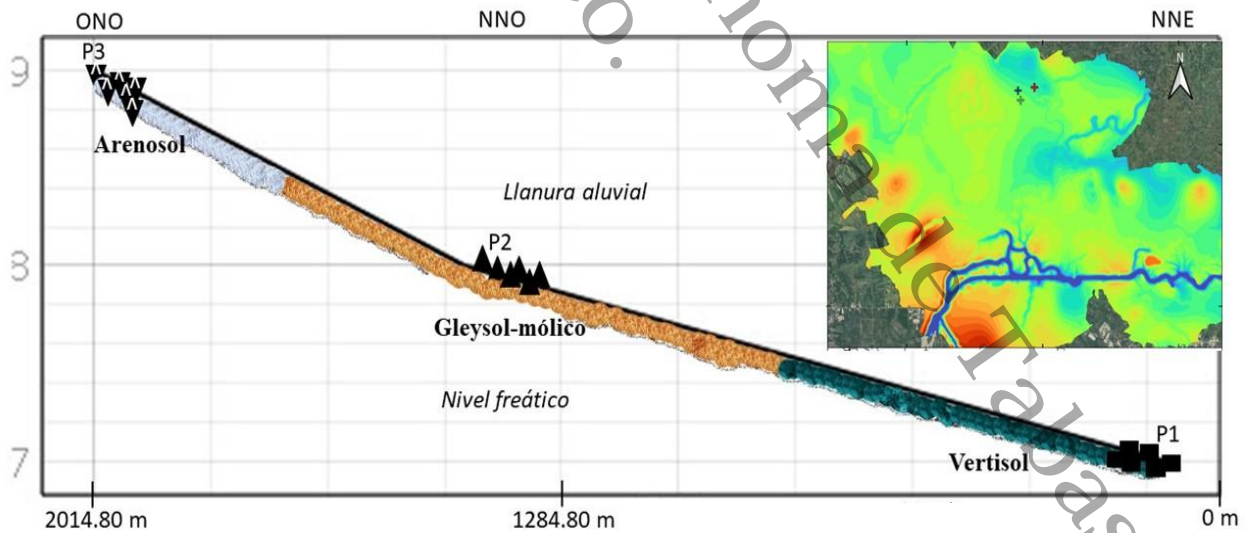


Figura 16. Perfil topográfico correspondiente a la trayectoria de muestreo de P1, P2 y P3. Diseño propio.

En la *Figura 17*, se muestran los perfiles más representativos de los polígonos de estudio donde se observan diferencias entre los grupos de muestras comprando con Palma et al. (2017); es decir, el P3 se constituye por suelos con muy bajos contenidos nutrimentales, bajos contenidos de materia orgánica, alta permeabilidad y muy poca humedad aprovechable para los cultivos, las cuales son propias de suelos *Arenosos*. Sin en cambio, para el polígono 1 los suelos dominantes son *vertisoles* constituidos por arcillas que se agrietan en la época de secas, alto contenido de materia orgánica y son zonas inundables. A diferencia, el polígono 2 es característicos de suelos *gleycos* que están saturados con agua durante la mayor parte del año con nivel freático somero y que manifiestan procesos de reducción de hierro, observándose en los perfiles la presencia de moteas con colores amarillentos, alto contenido de materia orgánica y nutrimentos.



Figura 17. Perfiles de suelos más representativos de los tres polígonos de estudio P1, P2 y P3. Diseño propio.

5.3 Resultados de la caracterización de la fertilidad edáfica de los suelos

La caracterización de la fertilidad edáfica de los suelos es proporcionada por los resultados de los parámetros físicos: Densidad Real (DR), Densidad Aparente (DA), Conductividad Eléctrica (CE), Porcentaje de Porosidad (%Po), Capacidad de Campo (CC), Materia Orgánica (MO) y textura; químicos: Potencial de hidrógeno (pH) y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

En las *Tablas 9, 10 y 11* se muestran los resultados de los análisis de los parámetros físicos y químicos, así como su desviación estándar, obtenidas con las especificaciones de la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Así mismo, se presentan los análisis de la prueba estadística de comparación de los 3 grupos independientes de muestras, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para verificar si la distribución de los datos es normal ($SW_c > SW_f$). También, el análisis de varianzas Anova para conocer si hay diferencias significativas en las medias ($p\text{-valor} < 0.005$) y la prueba Tukey para comparar todas las combinaciones posibles de pares de muestras de cada polígono para determinar cuáles difieren significativamente entre sí, calculando los intervalos de confianza, los cuales indican si la diferencia es estadísticamente significativa ($X_1 - X_2 > HSD, \alpha = 0.05$).

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 1 (uso de suelo agrícola tratado con productos químicos).

ID	pH	CE	CC	MO	DA	DR	P	A	AR	L
M1AGH1	4.87±0.06 ^a	0.19±0.01 ^b	60.55±0.10 ^a	2.72±0.14 ^a	1.25±0.02 ^c	1.86±0.08 ^a	32.46±3.49 ^a	39.99±4.16 ^a	0	59.33±4.16 ^a
M1AGH2	5.07±0.06 ^b	0.24±0.02 ^c	71.36±0.01 ^b	2.56±0.13 ^a	1.31±0.02 ^d	1.87±0.02 ^a	30.15±1.29 ^a	39.33±2.00 ^a	0	60.67±2.00 ^b
M2AGH1	5.03±0.06 ^b	0.20±0.01 ^b	73.90±0.02 ^b	5.66±0.28 ^b	1.18±0.03 ^c	1.86±0.14 ^a	36.45±5.33 ^a	35.46±2.13 ^a	0	64.54±2.13 ^b
M2AGH2	5.10±0.10 ^b	0.20±0.01 ^b	55.95±0.01 ^a	3.17±0.16 ^a	1.24±0.04 ^c	1.66±0.02 ^a	25.43±3.41 ^c	39.80±5.03 ^a	0	60.20±5.03 ^b
M3AGH1	4.83±0.06 ^a	0.21±0.01 ^b	46.02±0.06 ^a	4.15±0.21 ^a	1.22±0.01 ^c	1.75±0.09 ^a	30.04±3.51 ^c	50.71±1.15 ^b	0	49.33±1.15 ^a
M3AGH2	5.33±0.12 ^c	0.24±0.01 ^c	64.51±0.05 ^a	3.33±0.17 ^a	1.28±0.04 ^d	1.75±0.02 ^a	26.66±2.59 ^c	42.66±6.11 ^b	0	56.67±6.11 ^a
M4AGH1	5.43±0.06 ^d	0.21±0.01 ^b	59.19±0.09 ^a	3.20±0.16 ^a	1.22±0.02 ^c	1.79±0.08 ^a	31.79±2.78 ^c	42.71±3.06 ^b	0	57.29±3.06 ^a
M4AGH2	5.63±0.06 ^c	0.25±0.01 ^c	75.83±0.02 ^b	2.52±0.13 ^a	1.25±0.01 ^c	1.73±0.09 ^a	27.95±3.46 ^c	31.57±4.02 ^a	0	68.43±4.02 ^b
M5AGH1	5.10±0.00 ^b	0.18±0.01 ^a	54.82±0.08 ^a	6.56±0.33 ^b	1.11±0.02 ^a	2.01±0.10 ^b	44.52±2.45 ^b	32.04±3.46 ^a	0	67.96±3.46 ^b
M5AGH2	5.10±0.00 ^b	0.19±0.01 ^a	49.26±0.06 ^a	4.00±0.20 ^a	1.20±0.00 ^c	1.70±0.08 ^a	28.96±3.56 ^c	33.94±1.15 ^a	0	66.06±1.15 ^b
M6AGH1	5.37±0.06 ^c	0.23±0.01 ^c	53.28±0.03 ^a	3.64±0.18 ^a	1.31±0.05 ^d	1.74±0.04 ^a	24.96±3.23 ^c	37.86±1.57 ^a	0	62.14±1.57 ^b
M6AGH2	5.67±0.06 ^d	0.21±0.01 ^b	67.92±0.30 ^a	2.65±0.13 ^a	1.05±0.01 ^a	1.79±0.08	41.62±2.15 ^b	31.09±3.65 ^a	0	68.91±3.65 ^b
SWc	0.94	0.95	0.97	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95	NA	0.95
P valor	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	NA	<0.05
HSD	0.18	0.03	24.25	2.41	0.08	0.23	9.55	10.21	NA	10.21

Donde: letras distintas (a, b y c) indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935, NA= No Aplicable.

Tabla 10. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 2 (uso de suelo agrícola tratado con productos orgánicos).

	pH	CE	CC	MO	DA	DR	P	A	AR	L
M1OH1	4.87±0.06 ^d	0.22±0.01 ^d	58.84±2.94	3.88±0.19 ^b	1.03±0.02 ^a	1.79±0.02 ^a	42.63±1.19 ^a	58.95±1.01 ^c	0	41.05±1.01 ^a
M1OH2	4.80±0.00 ^c	0.12±0.01 ^a	49.23±2.46	1.43±0.07 ^a	1.16±0.01 ^c	1.68±0.09 ^a	30.70±4.25 ^b	49.27±2.31 ^b	0	48.61±2.31 ^a
M2OH1	4.90±0.00 ^d	0.22±0.01 ^d	59.93±3.00	1.10±0.05 ^a	1.08±0.01 ^b	1.82±0.06 ^a	40.47±2.62 ^a	49.94±1.15 ^b	0	50.06±1.15 ^b
M2OH2	4.87±0.06 ^d	0.23±0.00 ^e	54.67±2.73	9.39±0.47 ^c	1.08±0.01 ^b	1.71±0.09 ^a	36.71±3.99 ^a	47.65±3.31 ^b	0	52.35±3.31 ^b
M3OH1	4.60±0.00 ^a	0.15±0.01 ^b	57.83±2.89	0.83±0.04 ^a	1.12±0.03 ^b	1.73±0.10 ^a	35.25±4.63 ^a	51.51±1.01 ^b	0	48.49±1.01 ^a
M3OH2	4.60±0.00 ^a	0.13±0.01 ^a	45.68±2.28	1.77±0.09 ^a	1.12±0.02 ^b	1.76±0.05 ^a	36.21±1.74 ^a	36.47±3.16 ^a	0	63.53±3.16 ^c
M4OH1	4.90±0.00 ^d	0.18±0.01 ^c	57.24±2.86	2.75±0.14 ^b	1.12±0.01 ^b	1.82±0.10 ^a	38.12±3.85 ^a	46.90±4.07 ^b	0	53.15±4.07 ^b
M4OH2	4.60±0.00 ^a	0.12±0.01 ^a	29.71±1.49	1.68±0.08 ^a	1.22±0.04 ^c	1.79±0.11 ^a	31.48±2.31 ^b	58.71±3.06 ^c	0	41.29±3.06 ^a
M5OH1	4.80±0.00 ^c	0.19±0.01 ^c	46.25±2.31	3.11±0.16 ^b	1.17±0.02 ^c	1.79±0.02 ^a	34.37±1.82 ^b	53.99±1.15 ^b	0	46.01±1.15 ^a
M5OH2	4.70±0.00 ^b	0.15±0.01 ^b	41.95±2.10	2.06±0.10 ^a	1.16±0.02 ^c	1.75±0.03 ^a	33.78±2.74 ^b	54.47±1.41 ^b	0	44.85±1.41 ^a
M6OH1	4.90±0.00 ^d	0.17±0.00 ^c	46.47±2.32	3.32±0.17 ^b	1.11±0.00 ^b	1.93±0.12 ^b	42.64±3.51 ^a	44.23±1.57 ^a	0	55.57±1.57 ^b
M6OH2	5.00±0.00 ^e	0.17±0.01 ^c	42.57±2.13	2.49±0.12 ^b	1.16±0.01 ^c	1.95±0.11 ^b	43.08±3.31 ^a	37.33±5.29 ^a	0	62.72±5.29 ^c
SWc	0.94	0.95	0.99	0.94	0.98	0.94	0.98	0.95	NA	0.95
P valor	<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	NA	<0.05
HSD	0.07	0.02	35.16	1.54	0.06	0.25	9.35	8.03	NA	8.03

Donde: letras distintas (a, b y c) indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935, NA= No Aplicable.

Tabla 11. Propiedades físicas y químicas de los suelos del polígono 3 (TRSU).

	pH	CE	DA	DR	P	A	AR	L
MB1H1	7.85±0.03 ^a	0.89±0.02 ^c	1.39±0.00 ^b	1.63±0.04	14.44±1.91 ^b	91.89±0.00 ^c	0.11±0.00 ^a	8.00±0.00 ^a
MB1H2	7.82±0.01 ^a	0.91±0.03 ^c	1.40±0.01 ^b	1.62±0.09	13.63±5.30 ^b	74.56±1.15 ^b	0.11±0.00 ^a	25.33±1.15 ^c
MB2H1	7.70±0.02 ^d	0.97±0.03 ^c	1.36±0.03 ^b	1.63±0.07	16.54±1.75 ^b	71.22±1.15 ^a	1.44±1.15 ^a	27.33±1.15 ^c
MB2H2	7.75±0.02 ^a	0.98±0.01 ^c	1.35±0.04 ^b	1.67±0.06	18.89±4.82 ^b	75.22±1.15 ^b	0.11±0.00 ^a	24.67±1.15 ^c
MB3H1	7.88±0.02 ^a	0.89±0.01 ^c	1.32±1.50 ^b	1.65±0.08	19.97±4.35 ^b	83.89±0.00 ^c	0.11±0.00 ^a	16.00±0.00 ^b
MB3H2	7.70±0.02 ^d	0.97±0.03 ^c	1.36±0.03 ^b	1.63±0.07	16.54±1.75 ^b	70.22±1.15 ^a	2.44±1.15 ^b	27.33±1.15 ^c
MB4H1	7.82±0.01 ^a	0.87±0.07 ^d	1.22±0.04 ^a	1.66±0.03	19.10±1.87 ^b	69.22±1.15 ^a	0.78±1.15 ^a	30.00±2.00 ^d
MB4H2	7.76±0.04 ^a	0.49±0.01 ^a	1.34±0.01 ^b	1.70±0.15	20.57±7.59 ^b	75.03±1.03 ^b	0	25.52±1.35 ^c
MB5H1	7.17±0.06 ^c	0.38±0.07 ^b	1.23±0.03 ^a	1.78±0.02	30.63±1.67 ^a	70.66±1.15 ^a	0	29.28±2.00 ^d
MB5H2	7.35±0.02 ^b	0.78±0.01 ^d	1.20±0.02 ^a	1.63±0.03	26.09±0.40 ^a	75.03±1.03 ^b	0	26.00±1.11 ^c
MB6H1	7.82±0.01 ^a	0.81±0.03 ^d	1.19±0.06 ^a	1.62±0.02	26.16±3.78 ^a	91.22±1.15 ^c	0	9.33±1.15 ^a
MB6H2	7.69±0.14 ^d	0.83±0.02 ^d	1.32±0.02 ^b	1.65±0.03	19.95±2.49 ^b	74.56±1.15 ^b	0.11±0.00 ^a	25.33±1.15 ^c
SWc	0.95	0.98	0.99	0.94	0.96	0.98	0.94	0.98
P valor	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
HSD	0.14	0.10	0.08	0.20	10.92	3.34	2.48	4.42

Donde: letras distintas (a, b y c) indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935.

Potencial de hidrógeno (pH)

Análisis estadístico por polígono

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Los resultados presentados en la *Tabla 9*, muestran que los datos se ajustan a una distribución normal ya que sobrepasan el porcentaje mínimo del nivel de significancia ($\alpha=0.05$, $SWc > VC$); así mismo, la prueba Anova mostró que al menos una muestra es diferente a las demás ($p\text{-valor} < 0.05$) y por estas razones se realizó el análisis Tukey, indicando que entre M1AGH1 y M3AGH1 no existen diferencias significativas ($X1-X2 < HSD$), esto se repitió para otros tres grupos de muestras: M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M5AGH1 y M5AGH2; M3AGH2, M4AGH2 y M6AGH1; M4AGH1 y M6AGH2, las cuales no muestran diferencias significativas entre la media de los grupos ($HSD < 0.18$). No obstante, según la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002 (2000) las muestras M1AGH1 y M3AGH1 se encuentran dentro de la clasificación fuertemente ácido y las muestras M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M3AGH2, M4AGH1, M4AGH2, M5AGH1, M5AGH2, M6AGH1 y M6AGH2 son moderadamente ácidas (5.1-6.5).

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Los datos del pH se ajustan a una distribución normal ($\alpha=0.05$, $SWc > VC$); la prueba Anova para este polígono de muestras indicó que $p\text{-valor} < 0.05$, por ello se realizó el análisis Tukey el cual reveló que para 5 grupos de muestras no existen diferencias significativas entre la media de los grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 0.07$): M3OH1, M3OH2 y M4OH2; M5OH2; M1OH2 y M5OH1; M1OH1, M2OH1, M2OH2, M4OH1 y M6OH1; M6OH2. Sin embargo, según la clasificación de la NOM-021-SEMARNAT-2002 (2000) para pH las muestras son fuertemente ácidas (< 5.0). De acuerdo con los resultados presentados en la *Tabla 10*.

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

Para este grupo de muestra se exhibió que $SWc > VC$ para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$; además, la prueba Anova determinó que $p\text{-valor} < 0.05$ y por estas razones se realizó el análisis Tukey, el cual reflejó que entre 4 grupos de muestras no existen

diferencias significativas entre la media de los grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 0.14$): MB1H1, MB1H2, MB2H2, MB3H1, MB4H1, MB4H2, MB6H1; MB5H1; MB5H2; MB2H1, MB3H2 y MB6H2. Aunado a esto, según la NOM-021-SEMARNAT-2002 (2000) las muestras MB5H1 y MB5H2 se encuentran dentro de la clasificación neutra (6.6-7.3) y todas las demás muestras son medianamente alcalinas (7.4-8.5), de acuerdo con los resultados presentados en la *Tabla 11*.

Análisis estadístico de pH entre los polígonos P1, P2 y P3

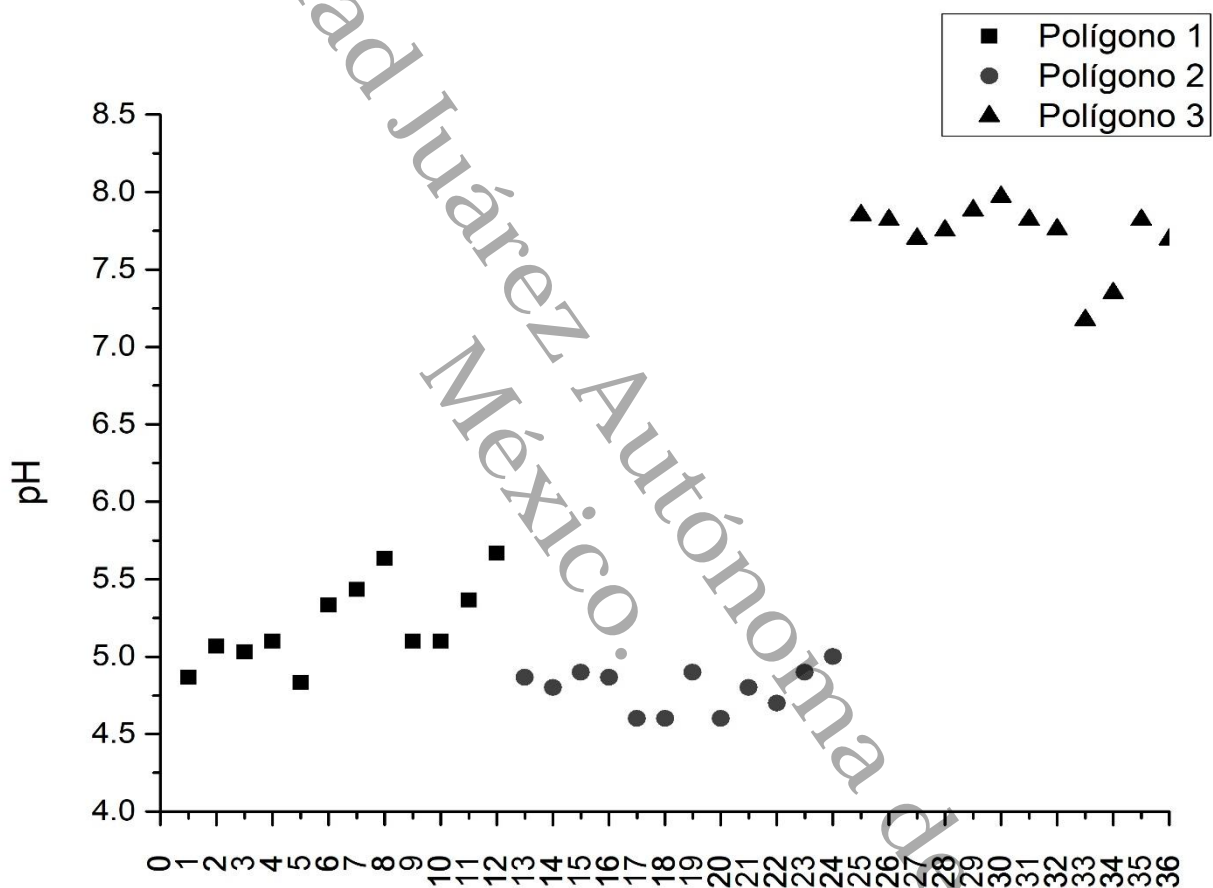


Figura 18. Resultado de pH de los polígonos P1, P2 y P3.

Se realizó una evaluación entre grupos, indicando que los polígonos P1, P2 y P3 se ajustan a una distribución normal ya que sobrepasan el porcentaje mínimo del nivel de significancia ($\alpha=0.05$, $SWc > VC$). Por otra parte, la prueba Anova determinó que al menos un grupo de muestras es diferente ($p\text{-valor} < 0.05$). Por ello, se realizó el análisis

Tukey, indicando que se encuentran diferencias significativas entre la media de los grupos (ver distribución de las medias de pH de muestras en *Figura 18*).

Uno de los principales indicadores de fertilidad edáfica de suelo es el pH. Palma-López et al., (2007), reporta suelos agrícolas con pH neutros a medianamente alcalinos, mencionando que esto se debe a la pérdida de cobertura vegetal, especialmente en vertisoles (como los suelos del área del P1). Por lo que encontrar niveles ácidos está relacionado con la conservación de suelos, observando estas condiciones de acidez y cubierta vegetal por las hojarasca de las plantas de cacao del P1.

No obstante, se ha verificado que el suelo puede presentar acidificación principalmente por el uso de diferentes tipos de fertilizantes: amoniacales de reacción ácida, como el sulfato de amonio; en base a nitrógeno, que al quedar en el suelo sin ser utilizado y necesitado por los cultivos es transformado a formas químicas que intensifican la acidez (Cremona & Enriquez, 2020; Ginés & Mariscal, 2002). Por tal motivo, es importante conocer la reacción del suelo y hacer una buena elección del fertilizante que se debe aplicar. Estos factores podrían estar contribuyendo a la acidez del suelo del P1 donde se aplican los productos químicos (*Tabla 9*), donde los pH son moderadamente ácidos en la mayoría de los puntos de muestreos y sus horizontes; es decir, esto se involucra con la vocación del uso de suelo como la agricultura con intensivo uso de agroquímicos.

Por otro lado, dentro de las actividades de conservación de suelo y restauración se realiza la aplicación de los abonos orgánicos como el tratamiento del polígono P2, lo cual ayuda a aumentar el pH encontrándose suelos neutros; esto asegura buena disponibilidad de nutrimentos para el cultivo (Triano et al., 2016). Sin embargo, estas condiciones neutras no se observan en los resultados de las muestras del P2 (*Tabla 10*) y podría atribuirse al efecto ocasionado por el contenido de MO. Es decir, suelos orgánicos ricos en MO tienden a ser ácidos ($\text{pH} < 5$) porque liberaran iones de hidrógeno (Cremona & Enriquez, 2020) y por la transformación de humus a ácidos húmicos y fúlvicos (Prat, 1981). No obstante, el P2 tiene menor porcentaje de contenido de MO en comparación con el P1 (véase *Figura 24*), por lo cual, la acidez podría estar atribuida a el tipo de producto que se agrega al suelo, a la conservación del suelo y cubierta vegetal.

La literatura indica que del cacao valores de entre 5.5-7.5 de pH suelen ser óptimos para el buen crecimiento y desarrollo de las plantas (Francisco et al., 2023; Van & Giller, 2017). Sin embargo, los valores de pH se pueden considerar como adecuados para el cultivo de cacao en todas las muestras del P2 y en la mayoría de las muestras del P1, excepto en tres muestras que pasan este límite.

La acidez puede tener diversos orígenes como: la naturaleza de la roca madre; la humedad, esta aumenta en zonas de mayor pluviosidad donde la evaporación es menor que la precipitación; pérdidas de base (Ca, Na, etc.) por un lavado excesivo o por la continua extracción de cultivos. Por otro lado, la textura del suelo arenoso y con menor contenido de MO se neutraliza más fácilmente que un suelo arcilloso, debido a que su poder amortiguador es más débil (Prat, 1981). Bajo estas consideraciones, se podría atribuir la acidez de las muestras del P2 a la humedad, pérdidas de base, ya que contienen bajos porcentajes de MO para realizarse la transformación de humus a ácidos húmicos y fúlvicos.

Las investigaciones realizadas por el Centro de Edafología y Biología Aplicada en el documento titulado "Importancia de la reacción del suelo" (1981) evidenciaron algunos valores de pH más convenientes para cada tipo de suelos: *humíferos* (5.0-5.5), *arenosos* (6.0-6.5), *areno-arcillosos* (6.5-6.8) y *limo-arcillosos* (7.0-7.8); sin dejar a un lado las exigencias específicas de cada cultivo. Por tanto, es fundamental analizar la reacción del suelo de pH con la textura. Así mismo, se ha planteado que las mejores condiciones de asimilabilidad de los diferentes nutrientes vegetales se presentan en pH ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos en las plantas de cacao (Dostert et al., 2011; Ginés & Mariscal, 2002).

Aunque el pH está relacionado con el porcentaje de arcillas y MO, a lo que habría que agregarle que los *gleysoles* y *vertisoles* poseen propiedades similares (pH ácidos y alta CIC), se observa que el P2 posee pH menores que el P1 y con porcentaje de arcillas similares. Algunos estudios mencionan que el manejo de los suelos influye en el pH (Lozano et al., 2004). Por ejemplo, el P1 es manejado con agroquímicos fosfatados (cipermetrina, 20-30-10, malation, grogreen, triple 1) en cambio el P2 se le agrega compostas de lombrices. En este sentido, Beltrán (2014), reporta que los suelos

agrícolas pueden presentar mayor número de microorganismos solubilizadores de fosfato y que uno de los factores que influye sobre este parámetro es el pH del suelo modificado por la adición de fertilizantes, que no solo aumenta el pH sino que también produce un aumento en la disponibilidad de nutrientes. En contraste, los productos de humificación liberan cationes que reducen el pH (Vázquez et al., 2020). Lo anterior coincide con lo observado en la *Figura 18*, en donde el P1 posee un pH ligeramente ácido y el P2 fuertemente ácido.

Capacidad de campo (CC)

Análisis estadístico por polígono

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Se aplicó la prueba Shapiro Will, la cual demostró que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; asimismo, la prueba Anova indicó que al menos una muestra es diferente a las demás ($p\text{-valor} < 0.05$). En efecto, se realizó la prueba Tukey, la cual señaló que las muestras son distribuidas en 2 grupos ($X_1-X_2 < HSD$, $HSD < 24.25$). Uno de los dos grupos de muestras está integrado por: M2AGH2, M2AGH1 y M4AGH2; el resto de las muestras corresponden al segundo grupo. De acuerdo con los resultados presentados en la *Tabla 9*.

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Para este conjunto de muestras (*Tabla 10*) la prueba Shapiro Will demostró que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; además, el análisis Anova señaló que todas las muestras son iguales ($p\text{-valor} > 0.05$).

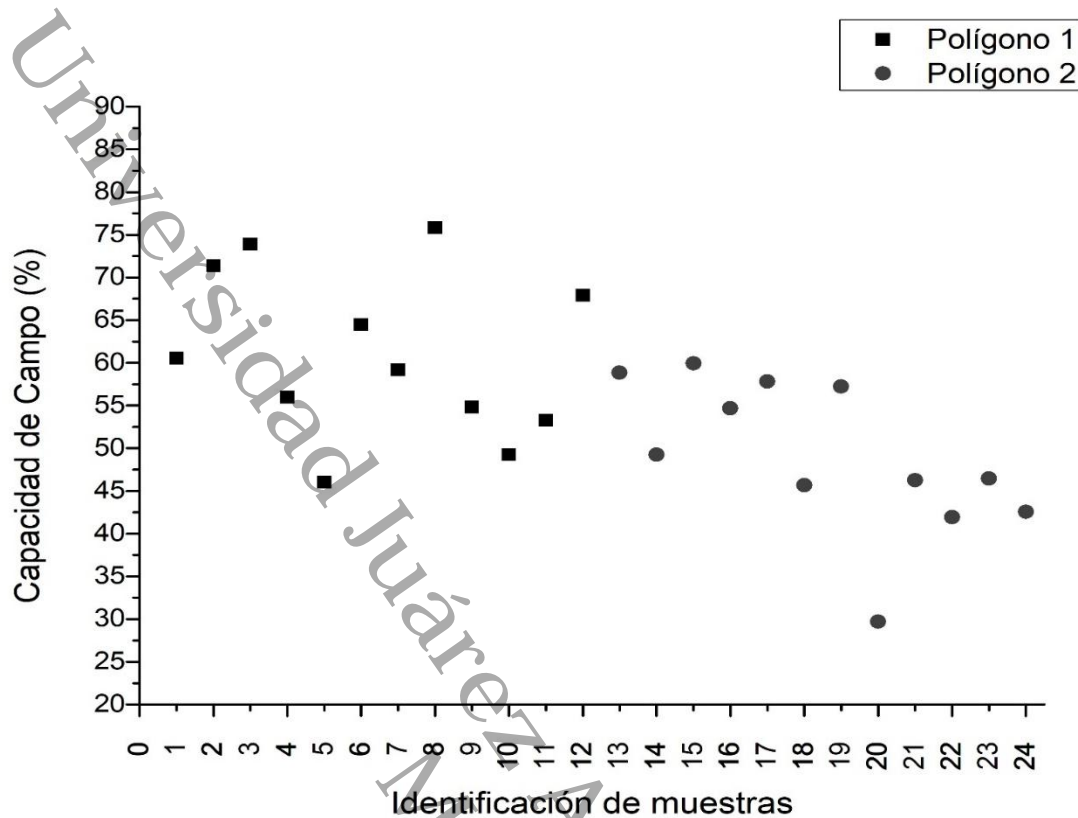


Figura 19. Resultado de capacidad de campo (CC) de los polígonos P1, P2 y P3.

Análisis estadístico de CC entre P1 y P2

La evaluación estadística entre grupos de Shapiro Will demostró que el P1 y P2 se ajustan a una distribución normal ($\alpha=0.05$, $SWc > VC$). Por otra parte, la prueba Anova determinó que los dos grupos de muestras son diferentes ($p\text{-valor} < 0.05$). Por ello, se realizó el análisis Tukey, indicando que encuentran diferencias significativas entre la media de los grupos (ver distribución de las medias de CC de muestras en *Figura 19*).

El parámetro físico de CC, se refiere al contenido de humedad que un suelo saturado puede retener dentro de sus poros bajo la acción de infiltración que origina la fuerza de gravedad (Medina Méndez et al., 2006). Está claro que existe una amplia diversidad de suelos en los que se cultiva el cacao (Dostert et al., 2011; Van & Giller, 2017). Aunque las condiciones adecuadas para el cultivo es no contener capas impermeables, deben tener la capacidad de almacenamiento de agua. Sin embargo, solo hasta un cierto punto

las inundaciones son toleradas por las plantas sin generar daños (Dostert et al., 2011). Se observan condiciones de inundación del suelo en el P1 por su posicionamiento en zonas de menor altitud topográfica (*Figura 12*) y al permanecer inundado en temporadas de lluvias, lo cual no ocurre en el P2. Además, la capacidad de retención de agua de un suelo para la producción de cacao depende sobre su estructura, textura y contenido de materia orgánica, así como de las condiciones climáticas (Van & Giller, 2017).

A pesar de que las altas precipitaciones favorecen la lixiviación y el mal drenaje, sus condiciones texturales amortiguan este efecto; sin embargo, los problemas de inundación que producen procesos de reducción y eliminación del hierro en condiciones anaeróbicas ocasionadas por saturación de agua generan desequilibrio de nutrientes (Reynosa & Díaz, 2016). Estas condiciones de anegamiento por periodos de 1-2 meses en temporadas de lluvias se presentan en el P1, pero comparando con la NOM-021 SEMARNAT-2002 (2000) no hay déficit de nutrientes de hierro (< 2.5 mg/kg esto se observa en la *Tabla 1*, apartado 2 del capítulo de Anexos).

Conductividad eléctrica (CE)

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Los datos se ajustan a una distribución normal ($SWc > VC$, $\alpha=0.05$). Al analizar los resultados (*Tabla 9*) de prueba Anova para CE encontramos que p -valor < 0.05 , siendo el HSD < 0.03 y las muestras que no tienen diferencias significativas entre ella son M5AGH1 y M5AGH2; M1AGH1, M2AGH1, M2AGH2, M3AGH1, M4AGH1 y M6AGH2; por último, M1AGH2, M3AGH2, M4AGH2 y M6AGH1. La Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002 (2000) es usada para la interpretación de los resultados de las muestras y era valores de referencia para su clasificación, observando que todas las muestras son agrupadas en efectos despreciables de la salinidad (< 1.0 CE dS/m a 25 °C).

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

El porcentaje de correlación de los datos calculados con Shapiro Will es mayor que el porcentaje mínimo requerido para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ ($SWc > VC$) y la prueba Anova del parámetro tiene como resultado que al menos una muestra es diferente

a las demás (p -valor < 0.05). El análisis Tukey indicó que para 5 grupos de muestras X_1 - $X_2 < \text{HSD}$ con $\text{HSD} < 0.07$: M1OH2, M3OH2 y M4OH2; M3OH1 y M5OH2; M4OH1, M5OH1, M6OH1 y M6OH2; M1OH1 y M2OH1; M2OH2. Sin embargo, según la clasificación de la NOM-021-SEMARNAT-2002 (2000) para CE todas las muestras tienen efectos despreciables de la salinidad (< 1.0 CE dS/m a 25 °C), de acuerdo con los resultados presentados en la *Tabla 10*.

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

De acuerdo con los resultados presentados en la *Tabla 11*, los datos se ajustan a una distribución normal para $\alpha=0.05$ ($\text{SWc} > \text{VC}$). La prueba Anova indicó que para este grupo de muestras el p -valor < 0.05 , por lo cual se realizó el análisis Tukey y se obtuvo que se agrupan en 4 conjuntos ($\text{HSD} < 0.10$): MB4H2; MB5H1; MB1H1, MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H1, MB3H2; MB4H1, MB5H2, MB6H1 y MB6H2, no teniendo diferencias significativas entre ellas (X_1 - $X_2 < \text{HSD}$). Según la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2002 todas las muestras son agrupadas dentro de la clasificación de efectos despreciables de la salinidad (< 1.0 CE dS/m a 25 °C).

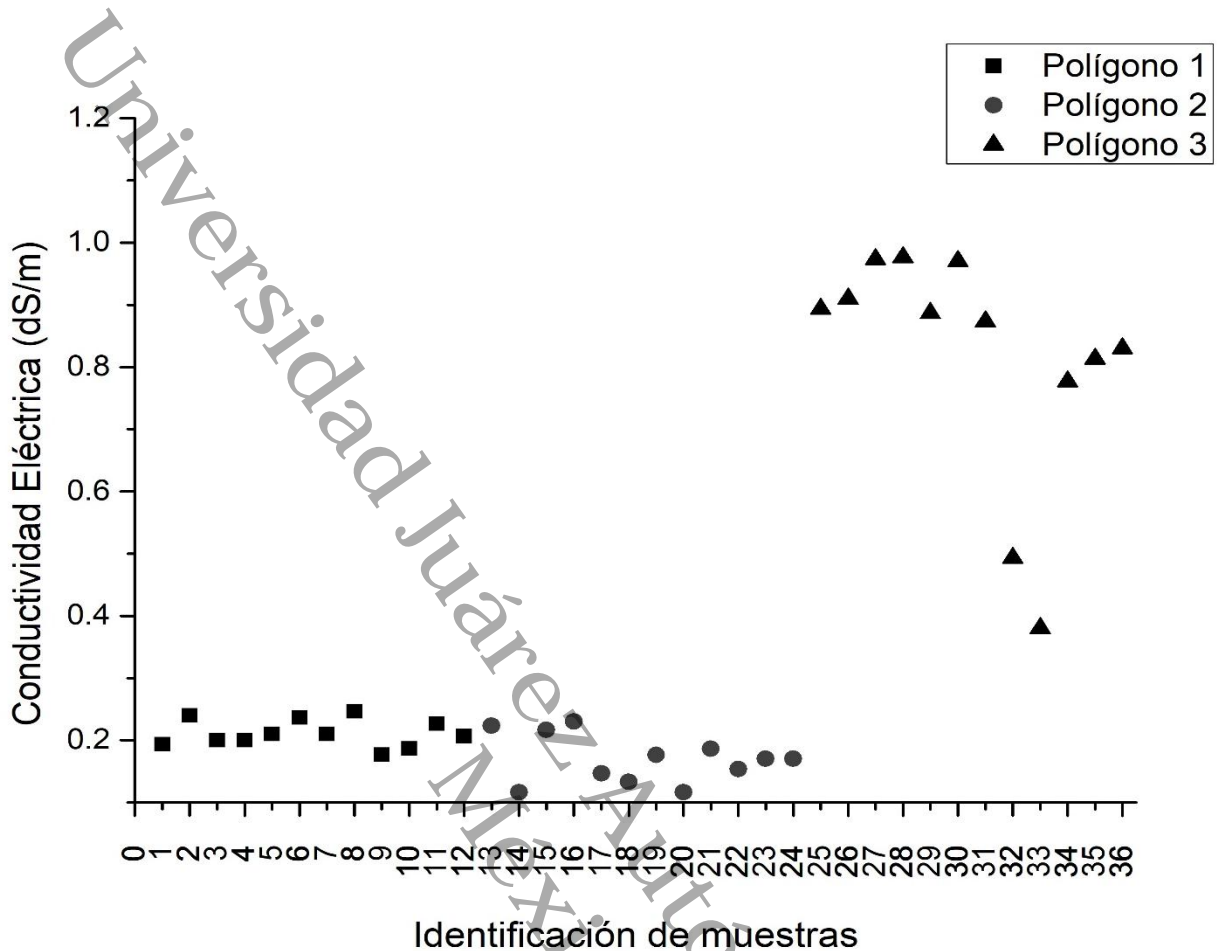


Figura 20. Resultado de conductividad eléctrica (CE) de los polígonos P1, P2 y P3.

Análisis estadístico entre P1, P2 y P3

De igual forma, se realizó la evaluación entre la media de los grupos Shapiro Will se obtuvo que los polígonos P1, P2 y P3 cumplen que $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$. Por otra parte, la prueba Anova mostró que solo P1 y P2 son iguales ($p\text{-valor} < 0.05$). Por ello, se realizó el análisis Tukey, indicando que P2 y P3 cumplen que $X_1-X_2 > HSD$, $HSD < 0.11$ (ver distribución de las medias de muestras de CE en Figura 20).

Cabe mencionar que el exceso de sales no favorece al crecimiento de las plantas, así como también a la actividad de los microorganismos del suelo. En este sentido, se evaluaron las muestras de los tres polígonos y se encontró que están dentro de un buen estado y presencia de salinidad que favorecen al desarrollo de las plantas (Cremona &

Enriquez, 2020). Sin embargo, los valores de CE de las muestras del P3 son mayores que las tendencias de los polígonos P1 y P2, esto podría estar asociado a la vocación de uso de suelo.

Densidad aparente (DA) y densidad real (DR)

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Se realizó la prueba Shapiro Will, obteniendo que los datos se ajustan a una distribución normal para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ ($SWc > VC$). La prueba Anova para DR y DA, se obtuvo que al menos una muestra es diferente a las demás con $p\text{-valor} < 0.05$ (*Tabla 9*), además la prueba Tukey para DR se tiene un $HSD < 0.23$ y para DA un $HSD < 0.08$. Casi todos los resultados de las muestras para DR cumplen que $X_1-X_2 < HSD$ excepto M5AGH1. Los grupos de muestras para DA cumpliendo con lo antes mencionado son: M6AGH2 y M5AGH1; M1AGH1, M2AGH1, M2AGH2, M3AGH1, M4AGH1, M4AGH2 y M5AGH2; M1AGH2, M3AGH2 y M6AGH1.

Los resultados de DA se interpretan y clasifican de acuerdo con la Norma Mexicana NOM O21-SERMARNAT-2002 (2000), las muestras: M2AGH1, M5AGH1 y M6AGH2 son de estructura arcillosas; M1AGH1, M1AGH2, M2AGH2, M3AGH1, M3AGH2, M4AGH1, M4AGH2, M5AGH2 y M6AGH1 son francosas.

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Se realizó la prueba de Shapiro Will, obteniendo que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$. La prueba Anova para DR y DA (*Tabla 10*), para ambos parámetros se obtuvo que al menos una muestra es diferente a las demás con $p\text{-valor} < 0.05$, además la prueba Tukey para DR se tiene un $HSD < 0.25$ y para DA un $HSD < 0.06$. Las muestras para DR se agrupan en 2 conjuntos ($X_1-X_2 < HSD$): M1OH1, M1OH2, M2OH1, M2OH2, M3OH1, M3OH2, M4OH1, M4OH2, M5OH1 y M5OH2; M6OH1 y M6OH2. Los grupos de muestras para DA cumpliendo con lo antes mencionado son: M1OH1; M2OH1, M2OH2, M3OH1, M3OH2, M4OH1 y M6OH1; M1OH2, M4OH2, M5OH1, M5OH2 y M6OH2.

Los resultados de DA se interpretan y clasifican de acuerdo con la norma mexicana NOM 021-SERMARNAT-2002, todas las muestras son arcillosas, excepto M4OH2 que es clasificada como francosa.

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

Se realizó la prueba de Shapiro Will, obteniendo que los datos de DR se ajustan a una distribución normal ($SW_c > VC$, $\alpha=0.05$), de lo contrario sucede para DA. La prueba Anova para DR señala que $p\text{-valor} < 0.05$, lo contrario que para DA. La prueba Tukey para DR se tiene un $HSD < 0.20$ (Tabla 11). Las muestras para DA se agrupan en 2 conjuntos, las cuales cumplen $X_1-X_2 < HSD$: MB4H1, MB5H1, MB5H2 y MB6H1; MB1H1, MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H1, MB3H2, MB4H2 y MB6H2.

La clasificación de DA se realizó de acuerdo con la norma mexicana NOM-021 SERMARNAT-2002, Las muestras: MB3H1, MB4H1, MB5H1, MB5H2 y MB6H2 son francosas; MB1H1, MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H2 y MB4H2 son arenosas; y MB6H1 es arcillosa.

Análisis estadístico entre P1, P2 y P3

La prueba Shapiro Will para DA, mostró que los grupos P1, P2 y P3 cumplen que $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$; la prueba Anova indicó que los tres grupos de muestras son diferentes entre sí con $p\text{-valor} < 0.05$ (ver distribución de las medias de muestras en Figura 21).

La DA se considera como una medida de la estructura del suelo, esta densidad junto con la DR permite calcular la porosidad total, y esto permite determinar la concentración de los sólidos en suspensión; la velocidad de sedimentación en la predicción de pérdida de suelo; la actividad biológica, entre otros (Amézquita, 1999; Delgado, 2017).

Los principales problemas de orden físico que se han observado y evaluado en suelos donde se realiza labranza intensa que ocasiona el cambio en la distribución de tamaño de agregados son: alta DA, sellamiento superficial, endurecimiento del suelo en la época seca, compactación, baja velocidad de infiltración, empobrece la distribución de tamaño y continuidad del espacio poroso. Por tanto, la literatura menciona que todos estos factores afectan la infiltración, disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, la penetración y crecimiento de las raíces (Amézquita, 1999; Le Bissonnais, 2016; Morales et al., 2022). Sin embargo, en los resultados de los polígonos P1 y P2 esta relación no se cumple; es decir, se observan valores altos de DA y alto porcentaje de CC para P1, y en el P2 se encuentra menor DA y menor porcentaje de CC (Figura 21 y Figura 19, respectivamente).

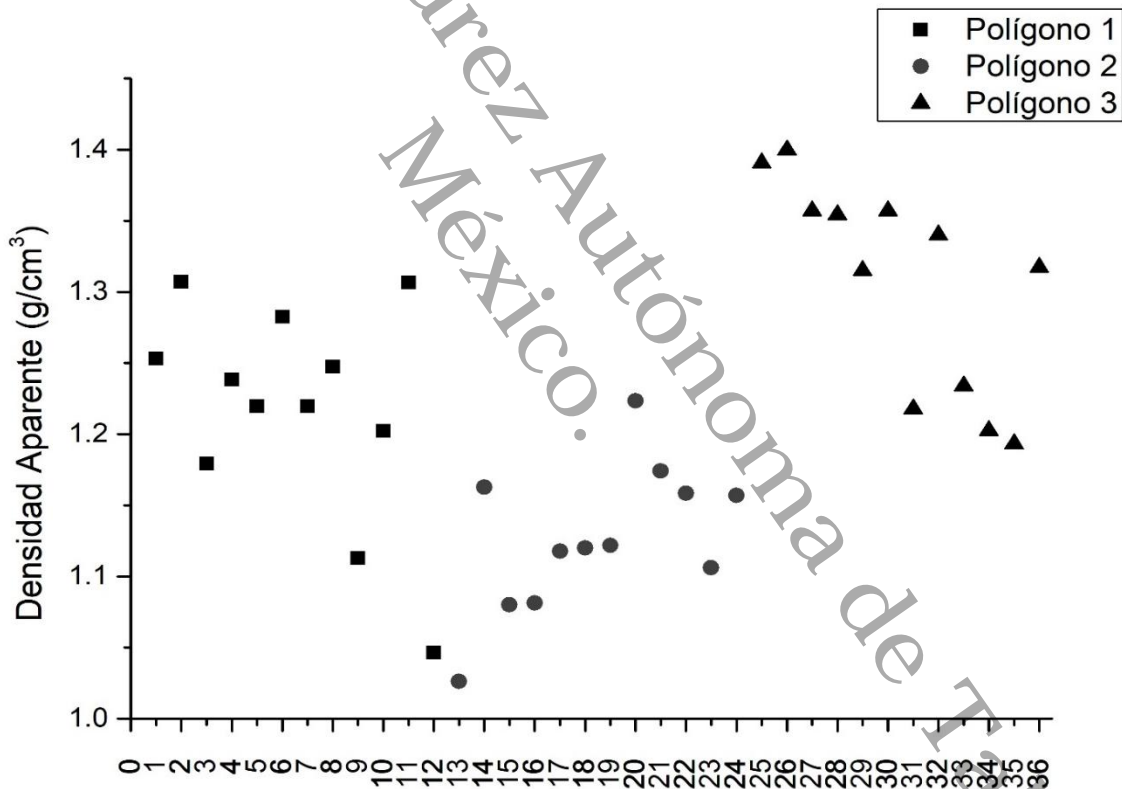


Figura 21. Resultado de Densidad Aparente (DA) de los polígonos P1, P2 y P3.

Principalmente, las actividades que se desarrollan en el P1 (uso excesivo de agroquímicos) es la labranza intensa, retiro de hojarasca y excavación de zanjas. Por ello, comparando los resultados de DA con los del P2 (Figura 21), efectivamente se

presentan valores mayores; el suelo del P2 se ve favorecido por su baja labranza. Estas condiciones disminuyen la capacidad de retención de humedad (Salamanca & Sadeghian, 2005), pero en el P1 ocurre lo contrario, es decir, entre mayor DA mayor CC. No obstante, esto se relaciona con la composición textural del suelo, ya que, a mayor contenido de MO, limos y arcillas, mayor es la DA y mayor el porcentaje de CC (Silva et al., 1988).

Además, durante la visita de campo y recolección de muestras del P1 se observó un endurecimiento severo del suelo en la época de sequía y compactación alta. Los suelos ricos de partículas de arcillas presentan un drenaje deficiente, dificultando el laboreo, generando mayor encharcamiento superficial, retención de agua, nutrientes y contenido de MO y resistencia a la erosión; esta partícula es la más activa física, química e hidrodinámica de los suelos (Delgado, 2017). De acuerdo con lo anterior, estos factores se podrían estar presentando mayormente en el P1 y muy poco en los suelos del P2. Según la clasificación de DA de la NOM-021-SEMARNAT-2002, los suelos son arcillosas si sus valores de DA son pequeños como los del P2; los de mayor valor corresponde a suelos arenosos y compactados (Morales et al., 2022), lo cual ocurre en el P3, y P1 corresponden a suelos limosos. Cordero (2018), indica que alta DA se asocia a un suelo altamente compactado y DA baja indica que la porosidad del suelo puede ser alta debido al espacio entre las partículas. Además, los fertilizantes químicos pueden ocasionar aumento de la compactación y disminución de MO (Casteblanco, 2018; Florida et al., 2019), lo cual se ve reflejado en P1.

Por otro lado, los valores de DA para el P3 (TRSU) tienen valores mayores en relación con los otros dos polígonos, ya que aquí se realizó relleno del área por mecanización, compactando el suelo y agregando suelo arenoso para la construcción de una cancha deportiva; esto se realizó para el restablecimiento y aprovechamiento del lugar patrocinado por el gobierno municipal.

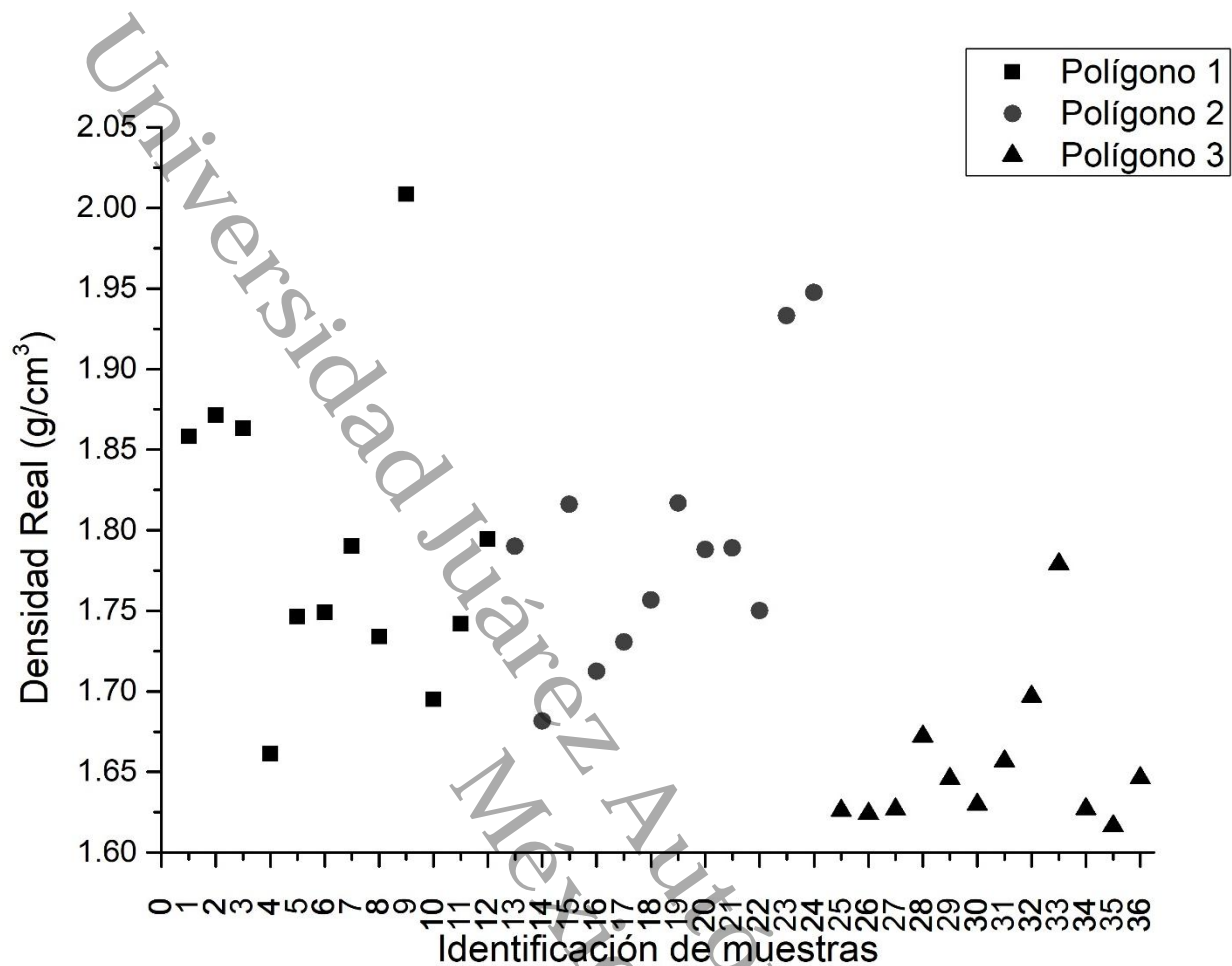


Figura 22. Resultado de Densidad real (DR) de los polígonos P1, P2 y P3.

La prueba Shapiro Will para DR, mostró que los grupos P1, P2 y P3 cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; por otra parte, la prueba Anova mostró que P1 y P2 son iguales y P3 es diferente a estos ($p\text{-valor} < 0.05$). Por ello, se realizó el análisis Tukey, indicando que $X1-X2 < HSD$, $HSD < 0.08$ (ver distribución de las medias de muestras en Figura 22).

La DR de un suelo depende principalmente de la composición, cantidad de minerales y de la proporción de MO e inorgánica que contiene (García, 2008). Lo cual, está asociado a el comportamiento de la distribución de la DR de las muestras del P1, por su mayor contenido de MO y CIC, ya que su composición textural tiene la capacidad de retener estos.

La DR relaciona el peso de las partículas sólidas de un suelo con el volumen ocupado por ellas sin tomar en cuenta la PO, por lo cual presenta valores casi constantes. Por el contrario, la DA es dependiente de la PO y adquiere valores muy variables aún en un mismo tipo de suelo, y es muy afectada por las actividades de manejo y la cantidad de MO (Brady & Weil, 1999; Medina et al., 2006). Por lo tanto, las partículas más pequeñas cuentan con espacios porosos menores y presentan DR mayor que un suelo con espacio porosos mayores como las arenas. Entonces, P1 es suelo compuesto por partículas más finas que P3, teniendo DR mayor.

POROSIDAD (PO)

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Se comprobó que los datos se ajustan a una distribución normal para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ ($SWc > VC$), así mismo la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por esta razón se realizó la prueba Tukey, la cual indicó que las muestras son distribuidas en 3 grupos. Los grupos de muestras son ($HSD < 0.92$): M1AGH1, M1AGH2 y M2AGH1; M5AGH1 y M6AGH2; M2AGH2, M3AGH1, M3AGH2, M4AGH1, M4AGH2, M5AGH2 y M6AGH1 (Tabla 9).

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Los datos cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$, además la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por ello se realizó la prueba Tukey, la cual indicó que las muestras son distribuidas en 2 grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 0.92$). Los grupos de muestras son: M1OH1, M2OH1, M2OH2, M3OH1, M3OH2, M4OH1, M6OH1 y M6OH2; M1OH2, M4OH2, M5OH1 y M5OH2 (Tabla 10).

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

La prueba Shapiro Will indicó que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; así mismo la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por ello se realizó la prueba Tukey, la cual indicó que las muestras son distribuidas en 2 grupos, en las cuales $X1-X2 < HSD$, $HSD < 0.92$. Los

grupos de muestras son: MB1H1, MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H1, MB3H2, MB4H1, MB4H2 y MB6H2; MB5H1, MB5H2 y MB6H1 (Tabla 11).

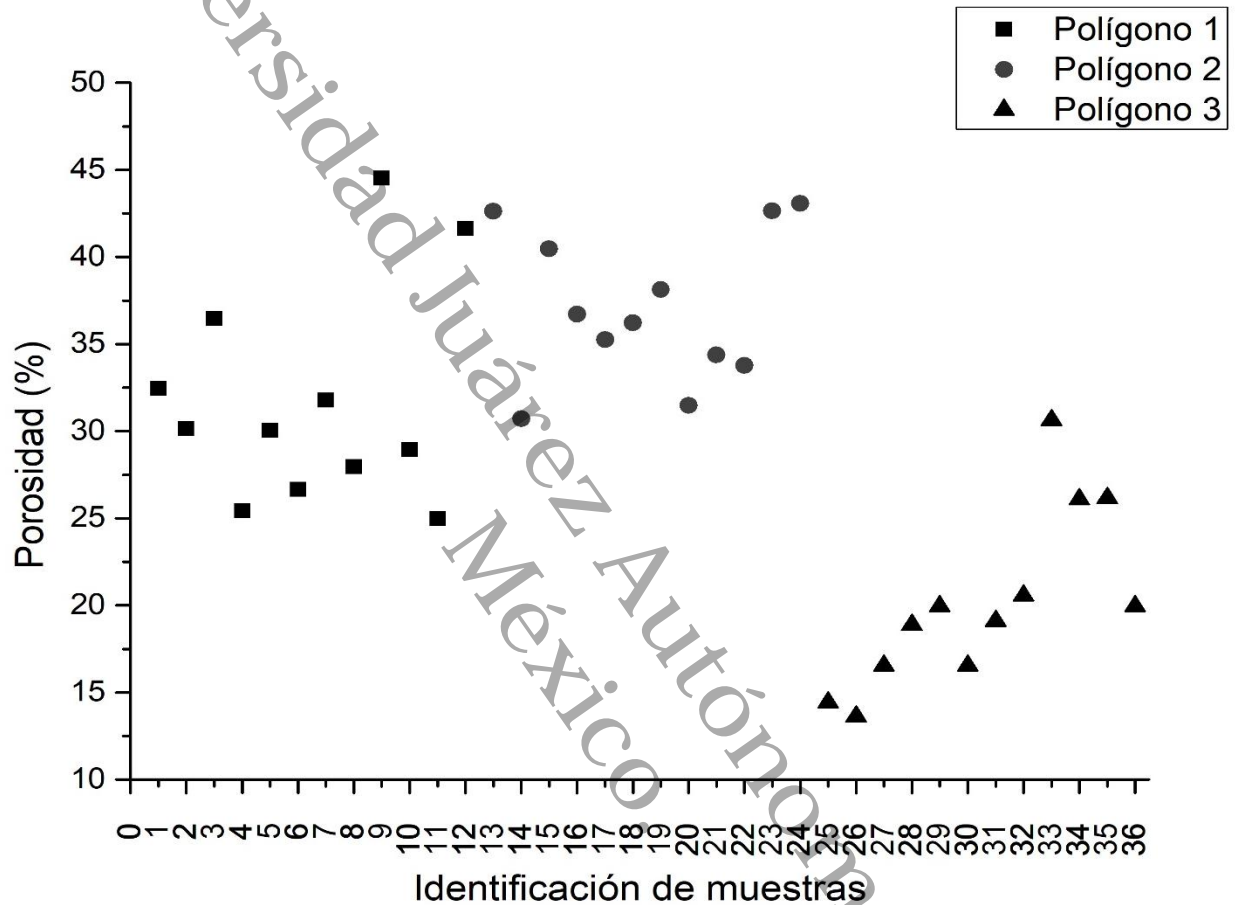


Figura 23. Resultado de porosidad (PO) de los polígonos P1, P2 y P3.

Análisis estadístico entre P1, P2 y P3

El análisis integrado de las medias de los tres grupos con la prueba Shapiro Will, indicó que los grupos P1, P2 y P3 cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; la prueba Anova determinó que los tres grupos de muestras son diferentes entre sí con $p\text{-valor} < 0.05$ (ver distribución de las medias de muestras en Figura 23).

La disminución de la porosidad (PO), el aumento de la densidad aparente (DA) y la pérdida de materia orgánica (MO) se presenta por degradación de la estructura del suelo a causa del uso agrícola (Buenaver & Rodríguez, 2016), esto se puede atribuir a los

resultados de PO, DA y MO para el P1 y P3. Es decir, comparando las gráficas de DA (Figura 21) y PO (Figura 23), se observa que entre mayor es la DA asociado al laboreo del suelo se tiene menor PO.

La PO se asocia a la variación del tipo y tamaño de las partículas que conforman al suelo, se expresa por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total; en general esto nos indica que las partículas de menor diámetro cuentan con mayor PO; en adicción a esto, una mayor PO presentan una menor permeabilidad, a menos que exista un arreglo de los poros adecuado como las fracturas (Cepeda, 1991; Coras, 1987; Navarro et al., 2002). Esto se puede ver en las tendencias de los resultados de la gráfica de porosidad, donde el P2 que está conformado por partículas de menor tamaño como las arcillas, tienen mayor PO.

Materia orgánica (MO)

Polígono 1 (Cultivos tratados con agroquímicos)

De igual manera, los datos $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$; también la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por esta razón se realizó la prueba Tukey, la cual señala que las muestras son distribuidas en 2 grupos ($X_1-X_2 < HSD$, $HSD < 2.41$). El primer grupo de muestras está conformado por: M2AGH1 y M5AGH1; el resto de las muestras integran al segundo grupo.

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

De igual manera, se aplicó la prueba Shapiro Will y mostró que los datos que $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$, también la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por esta razón se realizó la prueba Tukey, la cual mostró que las muestras son distribuidas en 2 grupos ($X_1-X_2 < HSD$, $HSD < 2.41$). El primer grupo de muestras está conformado por: M2AGH1 y M5AGH1; el resto de las muestras integran al segundo grupo.

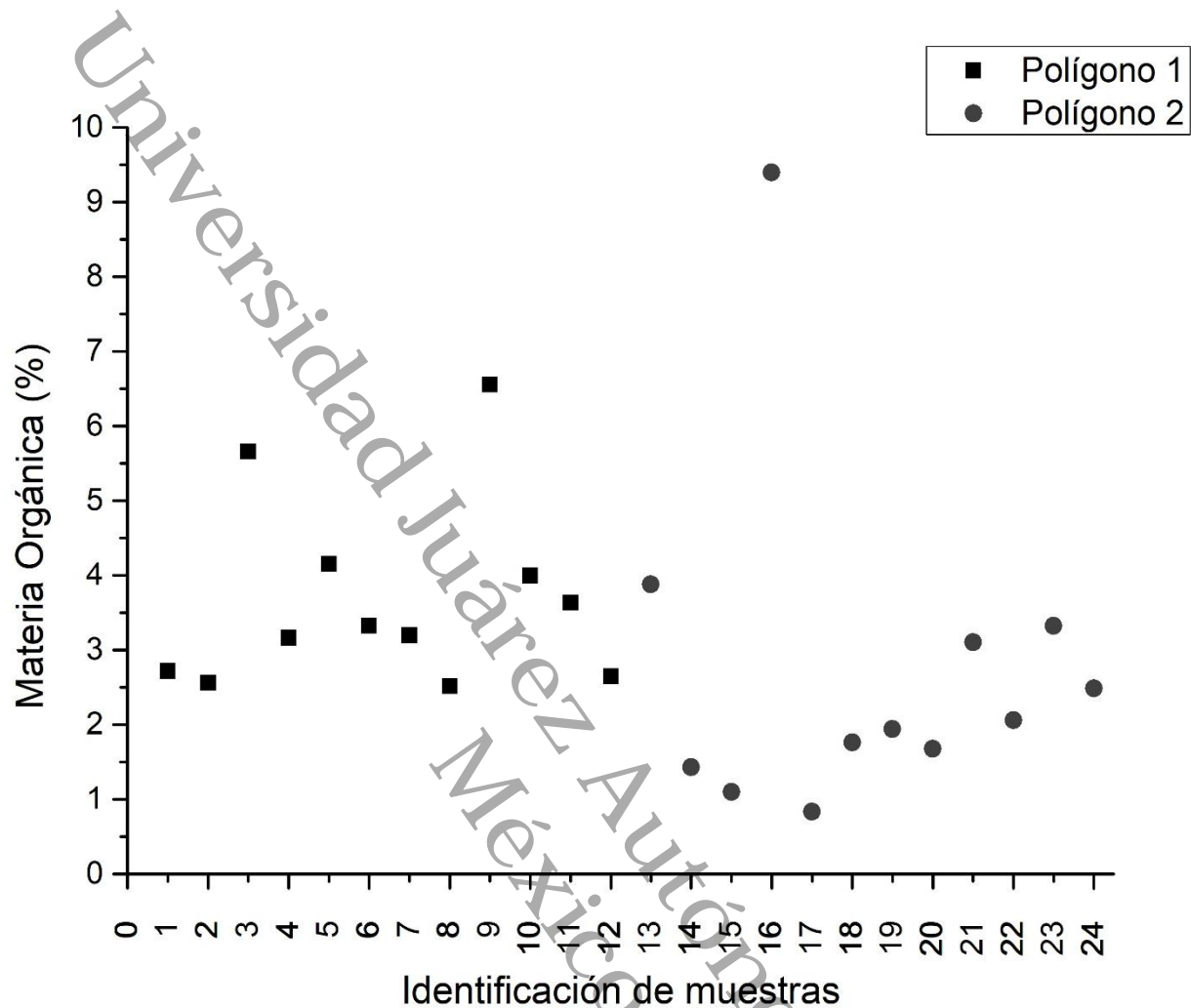


Figura 24. Resultado de materia orgánica (MO) de los polígonos P1, P2 y P3.

Análisis estadístico entre P1 y P2

El análisis entre los grupos P1 y P2 cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; Anova demostró que los dos grupos son iguales entre sí con $p\text{-valor} > 0.05$ (ver distribución de las medias de muestras en Figura 24).

La MO mejora la estructura del suelo, muchas de las moléculas orgánicas del humus favorecen la formación de los agregados al asociarse con las arcillas (Casas, 2012). Mejora la capacidad de retención de agua disponible para las plantas, siendo de mayor este efecto en los suelos de texturas gruesas, es decir, arenosas (Casas, 2012). Por otro

lado, el contenido de MO del suelo contaminado es la suma de materia biogénica (por la descomposición de vegetales y animales) y materia petrogénica (por hidrocarburos) (Martínez & López, 2001), lo cual podría estar ocurriendo en P3.

Medina et al. (2006), mencionan que contenido de MO y arcillas afecta directa y positivamente la CC, es decir, a mayor cantidad de MO y arcilla se incrementan el valor de la CC. Estas condiciones se observan gráficamente (Figura 19, 24 y 25) en P1 y P2, teniendo P1 mayor contenido de MO y alto porcentaje de limos+arcillas. Aunque P1, no es tratado con productos orgánicos tiene la capacidad de almacenar y descomponer más MO que P2 por su composición textural, ya que cuenta con suelos por su clasificación edafológica *vertisol*.

TEXTURA

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

Arenas (A)

Se obtuvo que $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$; por otra parte, la prueba Anova indicó que $p\text{-valor} < 0.05$. Por lo tanto, se realizó el análisis Tukey el cual indicó que para 2 grupos de muestras no existen diferencias significativas entre la media de los grupos ($X_1 - X_2 < HSD$, $HSD < 10.21$): M1AGH1, M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M4AGH2, M5AGHH1, M5AGH2, M6AGH1 y M6AGH2; M3AGH1, M3AGH2 y M4AGH2 (Tabla 9).

Limos (L) Y Arcillas (Ar)

Por otra parte, para el análisis de limos en las muestras la prueba Shapiro Will reportó que $SW_c > VC$ para $\alpha=0.05$; así mismo, la prueba Anova presentó que $p\text{-valor} < 0.05$. Posteriormente, la prueba Tukey exhibió que para 2 grupos de muestras se cumple que $X_1 - X_2 < HSD$ ($HSD < 10.21$): M1AGH1, M3AGH1, M3AGH2 y M4AGH1; M1AGH2, M2AGH1, M2AGH2, M4AGH2, M5AGH1, M5AGH2, M6AGH1 y M6AGH2 (Tabla 9).

Para las arcillas, la prueba Shapiro Will indicó que $SW_c > SW_f$ para $\alpha=0.05$; asimismo, el método Tukey determinó que no existen diferencias significativas entre la media de las muestras.

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Arenas (A)

Por consiguiente, la prueba Shapiro Will mostró que $SWc > VC$, $\alpha=0.05$; con la prueba Anova para este conjunto de muestras reflejó que $p\text{-valor} < 0.05$. En efecto, se realizó la prueba Tukey y estableció que para 3 grupos de muestras $X1-X2 < HSD$ ($HSD < 8.03$): M1OH2, M2OH1, M2OH2, M3OH1, M4OH1, M5OH1 y M5OH2; M6OH1, M6OH2 y M3OH2; M1OH1 y M4OH2 (Tabla 10).

Limos (L) Y Arcillas (Ar)

En lo que concierne al contenido de limos en las muestras, mostró la prueba Shapiro Will que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; así mismo, la prueba Anova mostró $p\text{-valor} < 0.05$. Posteriormente, la prueba Tukey mostró que para 3 grupos de muestras se cumple que $X1-X2 < HSD$ ($HSD < 8.03$): M1OH1, M1OH2, M3OH1, M4OH2, M5OH1 y M5OH2; M2OH1, M2OH2, M4OH1 y M6OH1 (Tabla 10); por último, el conjunto integrado por M3OH2 y M6OH2. En el caso de las arcillas, la prueba Shapiro Will indicó que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; asimismo, el método Tukey determinó que $X1-X2 < HSD$ ($HSD=0$).

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

Arenas (A)

En primera instancia, también se realizó la prueba Shapiro Will para este polígono y obteniendo que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; por esta razón, se condujo a realizar la prueba Anova para este conjunto de muestras mostrando que $p\text{-valor} < 0.05$. Además, se realizó la prueba Tukey y se demostró que para 3 grupos de muestras $X1-X2 < HSD$ ($HSD < 3.34$): MB2H1, MB3H2, MB4H1, MB5H1; MB1H2, MB2H2, MB4H2, MB5H2, MB6H2; MB1H1, MB3H1 y MB6H1 (Tabla 11).

Limos (L) Y Arcillas (Ar)

En lo que concierne al contenido de limos en las muestras, con la prueba Shapiro Will se determinó que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; así mismo, la prueba Anova mostró $p\text{-valor} < 0.05$. Posteriormente, la prueba Tukey estableció que para 4 grupos de muestras se

cumple que $X1-X2 < HSD$ ($HSD < 4.42$): MB1H1 y MB6H1; MB3H1; MB1H2, MB2H1, MB2H2, MB3H2, MB4H2, MB5H2 y MB6H2; MB4H1 y MB5H1 (Tabla 11).

Con respecto a las arcillas, la prueba Shapiro Will indicó que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$ y la prueba Anova exhibió $p\text{-valor} < 0.05$; asimismo, el método Tukey determinó que para 2 grupos de muestras se cumple que $X1-X2 < HSD$ ($HSD < 2.48$): el grupo 1 es MB3H2 y el segundo está integrado por todas las muestras.

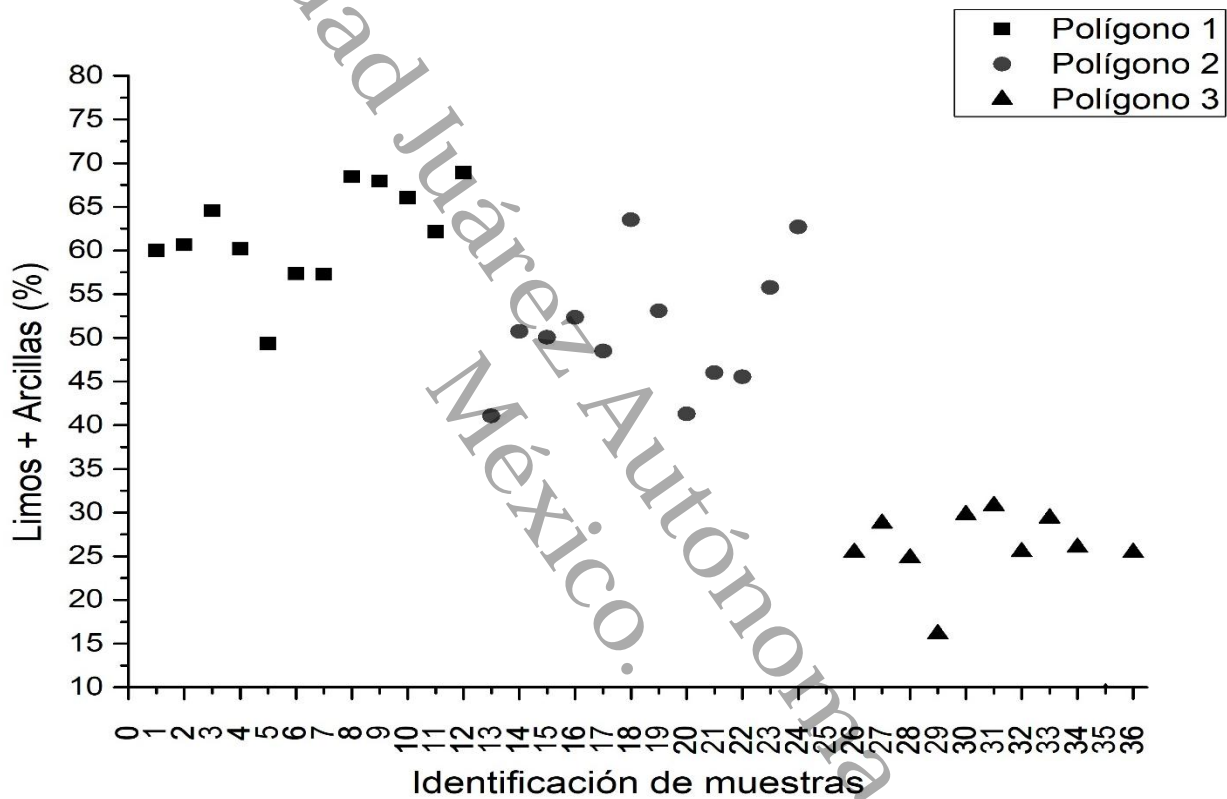


Figura 25. Resultado de porcentaje de limos + arcillas de los polígonos P1, P2 y P3.

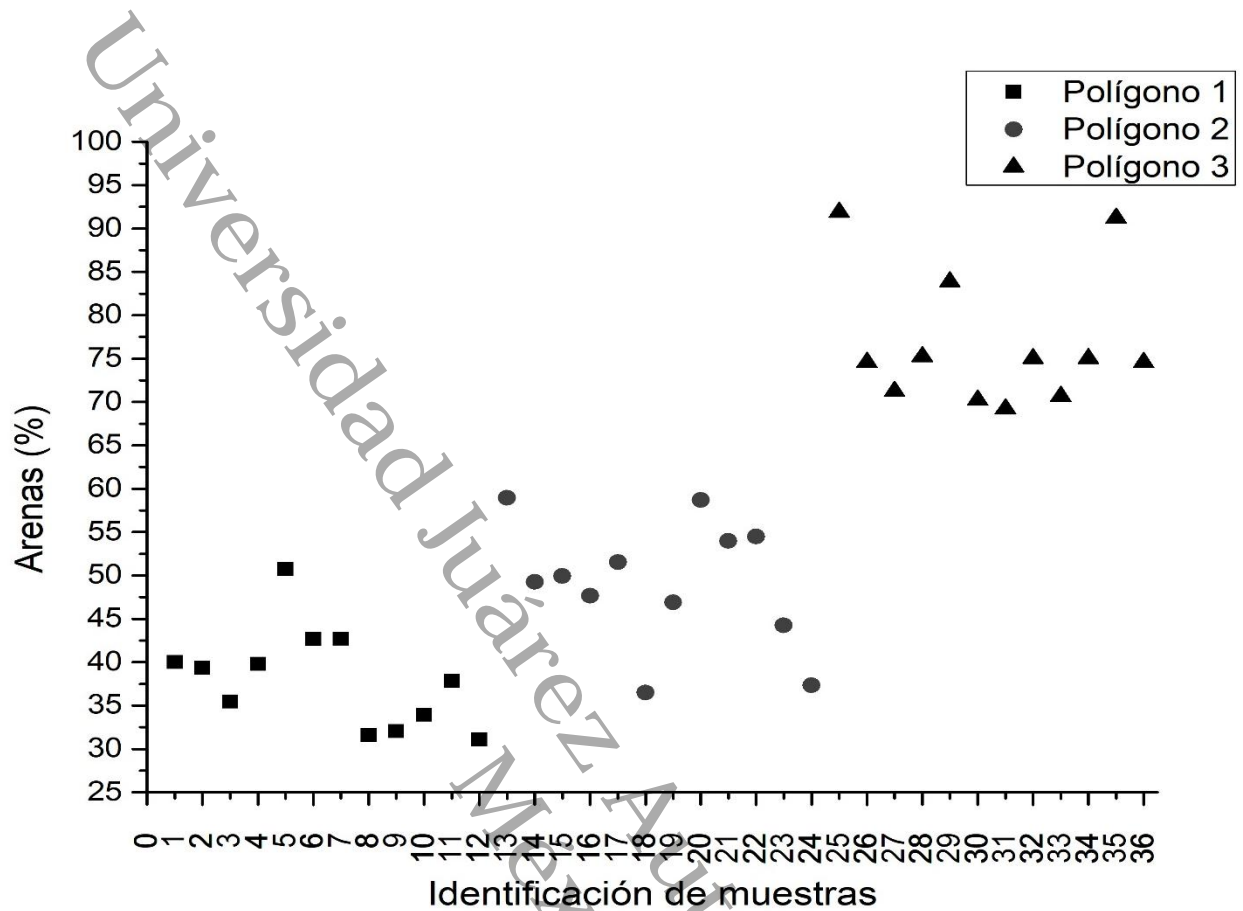


Figura 26. Resultado de porcentaje de arenas de los polígonos P1, P2 y P3.

Análisis estadístico entre P1, P2 y P3

El análisis de arenas entre los grupos P1, P2 y P3 cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; con la prueba de Anova se reporta que los tres grupos son diferentes entre sí con $p\text{-valor} < 0.05$ (ver distribución de las medias de muestras en Figura 26). Adicionalmente, el análisis Tukey, indicó que $X1-X2 < HSD$, $HSD < 6.94$. Sin embargo, el porcentaje de arcillas en los tres grupos de muestras son casi nulos e iguales entre sí; por lo tanto, se realizó el análisis con la suma del porcentaje de limos más arcillas. Por consiguiente, se obtuvo que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; con la prueba Anova se determinó que los tres grupos son diferentes entre sí con $p\text{-valor} < 0.05$ (véase distribución de las medias de muestras en Figura 25). Adicionalmente, el análisis Tukey, indicando que $X1-X2 < HSD$, $HSD < 6.86$.

Aunque los porcentajes de arcilla en el suelo puedan ser similares para diferentes áreas, no significa que los suelos tengan las mismas propiedades en el resto de ellos. Esto se puede ver en suelos con una clasificación textural similar, pero pueden estar compuestos por diferentes tipos de arcillas como las expandibles y otros no (Palma et al., 2017; Yzquierdo et al., 2022). Este tipo de diferencias entre P1 y P2 podría estar ocurriendo, ya que cuentan con clasificación texturales similares (*Figura 27*), pero con clasificación edafológicas diferentes.

Cuando existe el complejo arcillo-húmico, como lo es en el P1 y está formado por el estado de floculación, este tiene una carga eléctrica negativa y es capaz de absorber en la superficie iones de carga eléctrica positiva que son precisamente los elementos nutritivos de los suelos (Prat, 1981). La literatura indica que los suelos permeables arcillo-arenosos son ideales para un buen manejo y uso económico, con una composición del 50 % arena, 30-40 % arcilla, 1-2 % limo y una proporción relativamente alta de MO (> 3.5 %) (Dostert et al., 2011).

Sin embargo, el tamaño de partículas es un factor importante que hace que un suelo tenga mayor o menor CIC, mientras más pequeña sea la partícula, mayor será su CIC (Cordero, 2018); la *Figura 4.16* (gráfica de porcentaje de limos + arcillas) muestra que el P1 tiene mayor porcentaje de partículas finas que P2 y P3, lo cual podría estar beneficiando para mayor absorción de nutrientes y CIC, pero también influye a la mayor absorción de MP derivados por el uso de fertilizantes y agroquímicos. A pesar de que el limo puede aportar un bajo porcentaje a intercambio catiónico, permite el desarrollo y extensión de las raíces y del desarrollo del cultivo (Cordero, 2018), lo cual ocurre en P2. Por lo contrario, el P3 que está constituido por mayor porcentaje de arenas cuenta con bajo CIC y MO.

Como se describió anteriormente, una mayor cantidad de partículas finas o arcillas y asocia a tener alta MO (Naranjo et al., 2015); esto beneficia a tener mayor CC y CIC (Peñuelas & Ocaña, 1996), mejorando la estabilidad del suelo y mayor producción agrícola como lo que ocurre en P1.

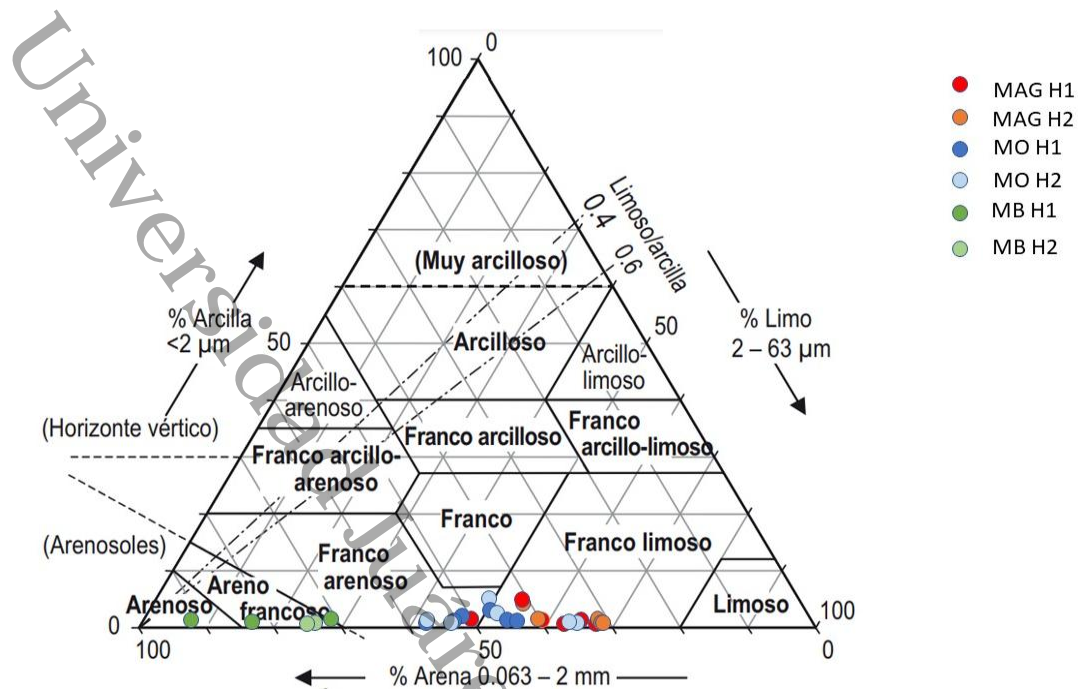


Figura 27. Clasificación textural de P1 (MAGH1, MAGH2), P2 (MOH1, MOH2) y P3 (MBH1, MBH2). B) polígonos P1 y P2.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y micronutrientes

La CIC, se considera como una propiedad y a través de esta es posible inferir sobre el tipo de arcilla, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de las muestras de suelos (SEMARNAT, 2000). Asimismo, se realizó la clasificación de los minerales arcillosos presentes en las muestras de suelos (ver *Tablas 12, 13 y 14*) según Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT 2000 (2003). La literatura indica que alto grado de intemperismo se ve reflejado en un valor de CIC inferior a 10 cmol/kg de suelo en un horizonte B con más de 30-40 % de arcilla, se asocia a la ausencia de minerales primarios intemperizables y la acumulación de minerales secundarios del grupo caolinítico y óxidos libres (SEMARNAT, 2000); lo cual, según los resultados para este parámetro no se presenta en ninguno de los polígonos de estudio.

Tabla 12. CIC de las muestras recolectas de los polígonos P1, P2, y P3.

ID	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Na (cmol/kg)	CIC (cmol/kg)	Grupo de arcillas	Porcentaje (%)			
							Ca	Mg	K	Na
M1AGH1	32.28±1.61 ^a	95.08±4.75 ^b	23.89±1.19 ^c	1.46±0.07 ^b	152.71±7.64 ^b		21.13	62.26	15.65	0.96
M1AGH2	32.79±1.64 ^a	99.67±4.98 ^b	25.52±1.28 ^c	1.69±0.08 ^c	159.66±7.98 ^b		20.54	62.42	15.98	1.06
M2AGH1	32.81±1.64 ^a	84.00±4.20 ^a	13.63±0.68 ^b	0.82±0.04 ^a	131.26±6.56 ^a	E, V	24.99	64.00	10.39	0.62
M2AGH2	30.16±1.51 ^a	82.72±4.14 ^a	10.21±0.51 ^a	0.77±0.04 ^a	123.86±6.19 ^a	E, V	24.35	66.78	8.24	0.62
M3AGH1	33.08±1.65 ^a	91.08±4.55 ^b	23.92±1.20 ^c	1.45±0.07 ^b	149.53±7.48	E, V	22.12	60.91	15.99	0.97
M3AGH2	32.10±1.61 ^a	81.93±4.10 ^a	9.61±0.48 ^a	0.84±0.04 ^a	124.48±6.22 ^a	E, V	25.79	65.82	7.72	0.68
M4AGH1	32.66±1.63 ^a	93.75±4.69 ^b	26.38±1.32 ^c	1.67±0.08 ^c	154.46±7.72 ^b	-	21.14	60.70	17.08	1.08
M4AGH2	30.27±1.51 ^a	78.83±3.94 ^a	24.54±1.23 ^c	1.66±0.08 ^c	135.30±6.77 ^a	E, V	22.37	58.27	18.14	1.23
M5AGH1	35.00±1.75 ^b	77.89±3.89 ^a	12.98±0.65 ^b	0.78±0.04 ^a	126.65±6.33 ^a	E, V	27.63	61.50	10.25	0.62
M5AGH2	32.17±1.61 ^a	94.33±4.72 ^b	27.41±1.37 ^d	1.78±0.09 ^c	155.69±7.78 ^b		20.66	60.59	17.61	1.14
M6AGH1	31.77±1.59 ^a	87.08±4.35 ^a	24.64±1.23 ^c	1.40±0.07 ^b	144.89±7.24 ^b	E, V	21.92	60.10	17.01	0.97
M6AGH2	31.27±1.56 ^a	91.75±4.59 ^b	13.65±0.68 ^b	0.90±0.05 ^a	137.57±6.88 ^a	E, V	22.73	66.69	9.92	0.66
SWc	0.99	0.97	0.83	0.84	0.96	NA	NA	NA	NA	NA
P valor	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	NA	NA	NA	NA	NA
HSD	4.74	13.02	3.06	0.20	20.89	NA	NA	NA	NA	NA

Donde: letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); E= esmectitas, V= vermiculitas, MH= micas hidratadas, C= cloritas; NA= No Aplicable. El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935. Cuantificación obtenida por medio del ICP-OES.

Tabla 13. CIC de las muestras recolectas del polígono P2.

ID	Ca (Cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Na (cmol/kg)	CIC (cmol/kg)	Grupo de arcillas	Porcentaje (%)			
							Ca	Mg	K	Na
M1OH1	41.21±2.06 ^d	66.29±3.31 ^d	17.95±0.90 ^e	1.53±0.08 ^c	126.97±6.35 ^d	E, V	32.45	52.21	14.14	1.20
M1OH2	30.09±1.50 ^b	68.71±3.44 ^d	12.27±0.61 ^c	1.09±0.05 ^b	112.15±5.61 ^d	E, V	26.83	61.26	10.94	0.97
M2OH1	40.91±2.05 ^d	61.02±3.05 ^c	11.80±0.59 ^c	1.00±0.05 ^b	114.73±5.74 ^d	E, V	35.66	53.18	10.29	0.87
M2OH2	29.48±1.47 ^b	59.86±2.99 ^c	10.77±0.54 ^c	0.96±0.05 ^b	101.07±5.05 ^c	E, V	29.17	59.22	10.66	0.95
M3OH1	34.65±1.73 ^c	68.71±3.44 ^d	19.71±0.99 ^f	1.47±0.07 ^c	124.55±6.23 ^d	E, V	27.82	55.17	15.83	1.18
M3OH2	24.62±1.23 ^a	61.61±3.08 ^c	7.43±0.37 ^b	0.69±0.03 ^a	94.35±4.72 ^c	E	26.10	65.30	7.87	0.73
M4OH1	37.88±1.89 ^c	57.40±2.87 ^c	15.83±0.79 ^d	2.80±0.14 ^d	113.90±5.70 ^d	E, V	33.25	50.39	13.90	2.46
M4OH2	22.75±1.14 ^a	56.27±2.81 ^b	5.21±0.26 ^a	0.66±0.03 ^a	84.88±4.24 ^b	E	26.80	66.29	6.14	0.78
M5OH1	36.64±1.83 ^c	57.46±2.87 ^c	17.33±0.87 ^e	1.48±0.07 ^c	112.90±5.65 ^d	E, V	32.45	50.89	15.35	1.31
M5OH2	32.13±1.61 ^b	2.93±0.15 ^a	15.17±0.76 ^d	1.35±0.07 ^c	51.57±2.58 ^a		62.29	5.69	29.41	2.61
M6OH1	30.92±1.55 ^b	56.08±2.80 ^b	7.83±0.39 ^b	0.80±0.04 ^a	95.63±4.78 ^c	E	32.33	58.64	8.19	0.84
M6OH2	21.49±1.07 ^a	48.33±2.42 ^b	7.56±0.38 ^b	0.73±0.04 ^a	78.10±3.91 ^b	E, V	27.51	61.87	9.68	0.94
SWc	0.95	0.66	0.93	0.80	0.93	NA	NA	NA	NA	NA
P valor	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	NA	NA	NA	NA	NA
HSD	4.79	8.52	1.95	0.20	15.16	NA	NA	NA	NA	NA

Donde: letras distintas (a, b, c y d) indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); E= esmectitas, V= vermiculitas, MH= micas hidratadas, C= cloritas; NA= No Aplicable. El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935. Cuantificación obtenida por medio del ICP-OES.

Tabla 14. CIC de las muestras recolectas del polígono P3.

ID	Ca (Cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Na (cmol/kg)	CIC (cmol/kg)	Grupo de arcillas	Porcentaje (%)			
							Ca	Mg	K	Na
MB1H1	18.29±0.91 ^a	17.62±0.88 ^a	2.30±0.12 ^a	0.72±0.04 ^b	38.93±1.95 ^a	MH, C	46.98	45.25	5.91	1.85
MB1H2	16.13±0.81 ^a	13.46±0.67 ^a	1.72±0.09 ^a	0.63±0.03 ^b	31.95±1.60 ^a	MH, C	50.49	42.13	5.40	1.98
MB2H1	47.53±2.38 ^c	28.03±1.40 ^b	5.53±0.28 ^d	1.00±0.05 ^d	82.10±4.10 ^c	E	57.89	34.15	6.74	1.22
MB2H2	54.10±2.71 ^c	33.34±1.67 ^c	7.14±0.36 ^e	1.06±0.05 ^d	95.64±4.78 ^c	E	56.57	34.86	7.46	1.10
MB3H1	50.35±2.52 ^c	32.28±1.61 ^c	5.47±0.27 ^d	0.99±0.05 ^d	89.09±4.45 ^c	E	56.52	36.23	6.14	1.11
MB3H2	86.85±4.34 ^d	52.01±2.60 ^d	5.88±0.29 ^d	0.76±0.04 ^c	145.50±7.28 ^d	E, V	59.69	35.74	4.04	0.52
MB4H1	33.15±1.66 ^b	24.13±1.21 ^b	2.64±0.13 ^b	0.96±0.05 ^d	60.88±3.04 ^b		54.44	39.64	4.33	1.58
MB4H2	17.85±0.89 ^a	30.58±1.53 ^c	5.26±0.26 ^d	0.55±0.03 ^a	54.23±2.71 ^b		32.91	56.38	9.69	1.02
MB5H1	14.72±0.74 ^a	24.28±1.21 ^b	3.49±0.17 ^c	0.51±0.03 ^a	43.01±2.15 ^a		34.23	56.46	8.12	1.19
MB5H2	89.70±4.49 ^d	59.52±2.98 ^d	5.98±0.30 ^d	0.67±0.03 ^b	155.87±7.79 ^d		57.55	38.18	3.84	0.43
MB6H1	34.31±1.72 ^b	25.78±1.29 ^b	5.74±0.29 ^d	1.10±0.06 ^e	66.93±3.35 ^b	MH, C	51.26	38.51	8.58	1.65
SWc	0.86	0.87	0.89	0.91	0.88	NA	NA	NA	NA	NA
P valor	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	NA	NA	NA	NA	NA
HSD	7.13	4.87	0.72	0.12	15.16	NA	NA	NA	NA	NA

Donde: letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P \text{ valor} \leq 0.05$); E= esmectitas, V= vermiculitas, MH= micas hidratadas, C= cloritas; NA= No Aplicable. El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.935. Cuantificación obtenida por medio del ICP-OES.

Polígono 1 (cultivos tratados con agroquímicos)

En la evaluación estadística se cumple que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; aunado a esto, la prueba Anova indica que $p\text{-valor} < 0.05$. Por esta razón se realizó la prueba Tukey, la cual determinó que las muestras son distribuidas en 2 grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 20.89$) (Tabla 12).

Polígono 2 (cultivos tratados con productos orgánicos)

Para este polígono (Tabla 13) se cumple que $SWc > VC$, para $\alpha=0.05$; además, Anova indicó que al menos una muestra es diferente a las demás ($p\text{-valor} < 0.05$). Asimismo, se realizó la prueba Tukey, obteniendo que las muestras son distribuidas en 5 grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 15.16$).

Polígono 3 (tiradero de residuos sólidos urbanos)

Para este conjunto de muestras (Tabla 14), se cumple que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; aunado a esto, la prueba Anova indica $p\text{-valor} < 0.05$. Por esta razón se realizó la prueba Tukey, la cual reveló que las muestras son distribuidas en 4 grupos ($X1-X2 < HSD$, $HSD < 15.16$).

Análisis estadístico entre P1, P2 y P3

El análisis entre las medias de las muestras de los grupos con la prueba Shapiro Will, indicó que los grupos P1, P2 y P3 cumplen que $SWc > VC$ para $\alpha=0.05$; la prueba Anova determinó que los tres grupos de muestras son diferentes entre sí con $p\text{-valor} < 0.05$. Además, Tukey indicó que $X1-X2 < HSD$, $HSD < 27.18$.

Se señala que cuando existe una adecuada relación de temperatura, humedad y aire, el crecimiento de "*Theobroma cacao*" depende de la disponibilidad de nutrientes. No obstante, el marchitamiento fisiológico de los frutos se considera como indicador de un desequilibrio y deficiencia de nutrientes (Hardy, 1961); lo cual se observó en P1. Sin embargo, también se ven afectadas las plantas por compactación y labranza de los suelos que originan restricción para la penetración de las raíces, disminuyendo con ello su capacidad de exploración, extracción de agua y nutrimentos (Medina et al., 2006),

esto se asocia a la vocación de uso de suelo, mayormente en P1 se realiza labranza intensa y presentando estas condiciones.

Así mismo, para que las plantas "*Theobroma cacao*" tengan un desarrollo óptimo, los suelos deben de tener buena disponibilidad de P (8 ppm) y una concentración suficiente de micronutrientes como Ca (8 ppm), K (0.24 ppm) y Mg (2 ppm) (Dostert et al., 2011). Por lo cual, los resultados de las lecturas de las concentraciones de estos micronutrientes para P1, P2 y P3 exceden lo requerido por las plantas para su desarrollo (ver en capítulo de anexos en apartado 2, *Tabla 1*). El exceso de micronutrientes afecta el desarrollo y los rendimientos de las plantas, reduciéndose significativamente. El manejo de los micronutrientes debe ser cuidadoso para evitar problemas de toxicidad y no superar el nivel (Lora, 2007).

Los requerimientos de nutrientes para las plantas de cacao varían de acuerdo al material de siembra, las condiciones de cultivo y al grado de sombreado. La máxima producción de cacao resultará de un sombrero moderado con un suelo de fertilidad natural alta o adecuadamente fertilizado (Compañía Nacional de Chocolates, 1988). En este mismo sentido, la fertilidad del suelo se relaciona con la clasificación elaborada con métodos apropiados tanto en suelos ácidos como alcalinos de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT; obteniendo que la CIC de los tres polígonos son de clase muy alta. De la misma forma, la interpretación de resultados para los nutrientes Ca, Mg y K en las tres áreas de estudio según la norma antes mencionada para los análisis de las bases intercambiables pueden interpretarse como clasificación alta. En las *Figuras 28 y 29*, se observa la distribución de la concentración de los minerales en los suelos, donde se encuentran mayor concentración de minerales en P1 (*Figura 28*) en comparación a P2 (*Figura 29*).

El pH del suelo influye en la capacidad de asimilabilidad de los nutrientes vegetales y las mejores condiciones se encuentran dentro del rango de ligeramente ácidos (Ginés & Mariscal, 2002); por lo tanto, P2 siendo moderadamente ácido se adapta mejor a estas condiciones de pH que el P1 como fuertemente ácido. En suelos desarrollados, con precipitación abundante se pueden presentar pérdida de bases por efecto de la lixiviación y por extracción de los cultivos. Como resultado, se obtiene la reducción del pH y la

escasez de nutrientes para los cultivos (Azañero, 2016). Este efecto se presenta en los suelos descalcificados que ocasionan procesos de acidez, en su mayoría por la presencia del agua de lluvia constante, la cual contiene una pequeña cantidad de gas carbónico y es capaz de disolver la caliza existente en el suelo, de tal forma que el Ca es lixiviado en forma de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (bicarbonato de Ca) (Ginés & Mariscal, 2002).

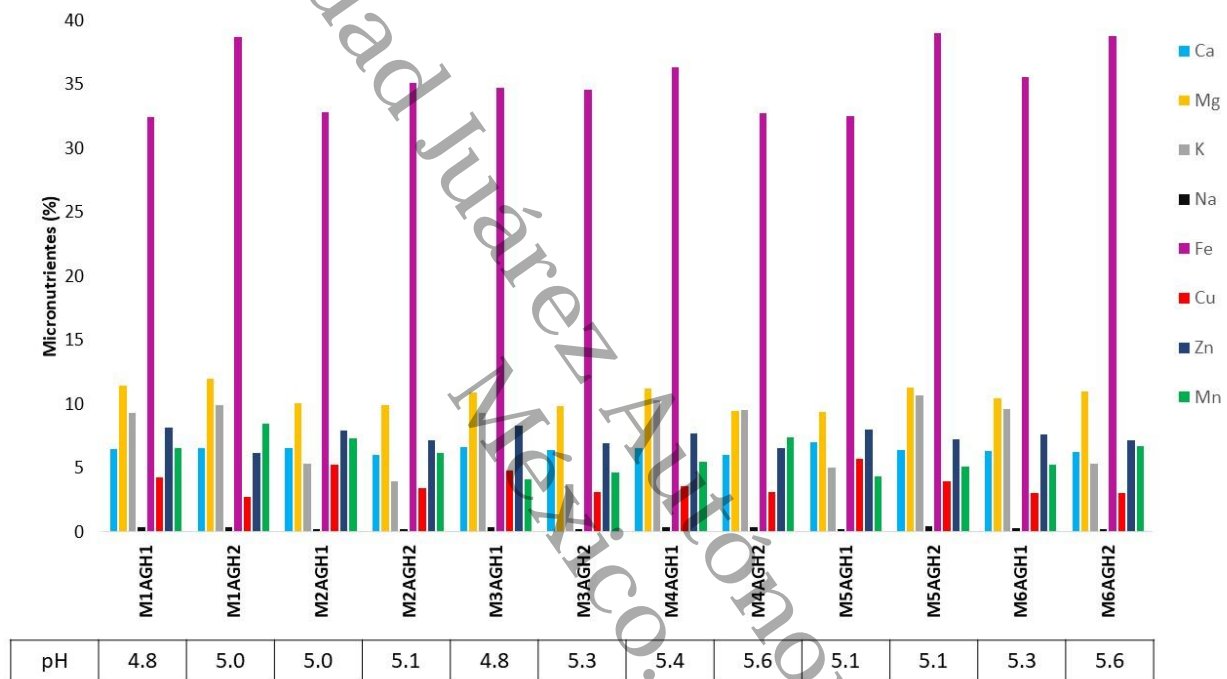


Figura 28. Disponibilidad de nutrientes con respecto al pH en los suelos del polígono P1.

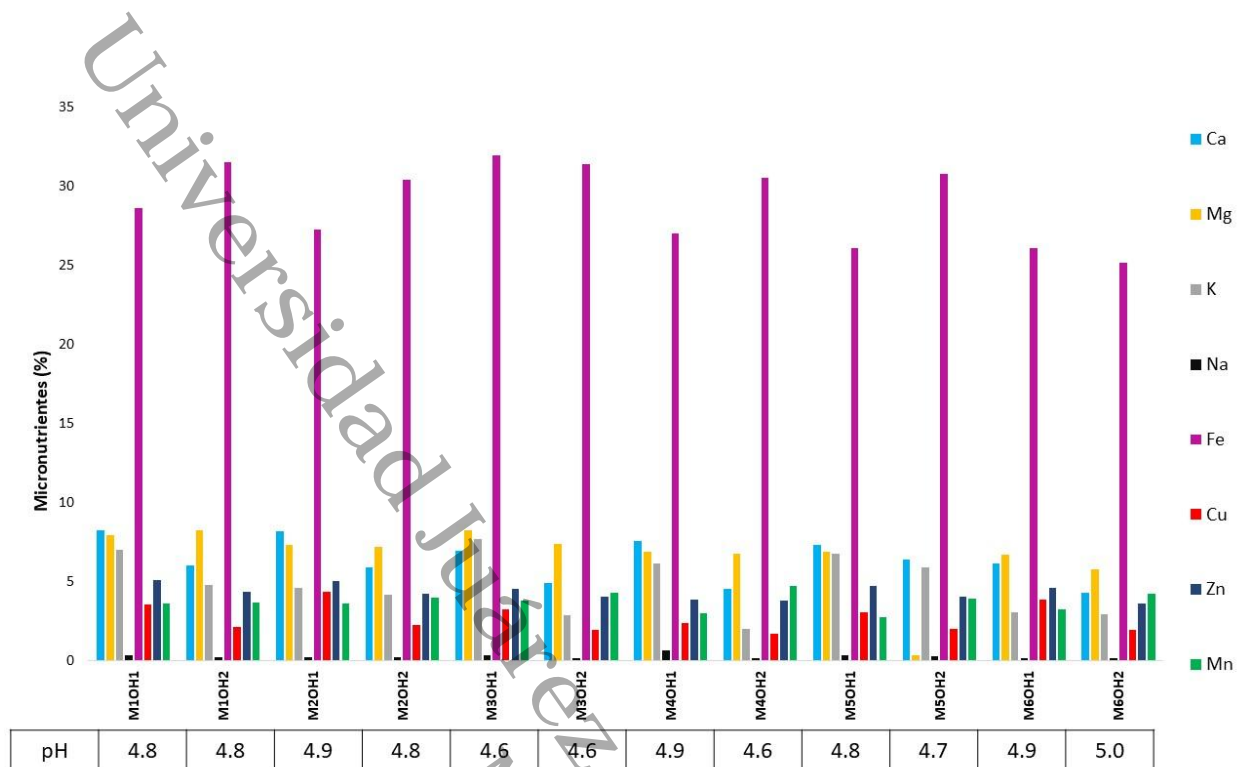


Figura 29. Disponibilidad de nutrientes con respecto al pH en los suelos del polígono P2.

Las concentraciones de algunos nutrientes en grandes cantidades pueden ser tóxicos para el suelo y las plantas. Sin embargo, esto tiende a ocurrir especialmente a pH bajo con nutrientes como el Al y Mn o en condiciones reductoras con el Mn. A pesar de que el Cu y el Zn son tóxicos cuando están biodisponibles en grandes cantidades, estas condiciones pocas veces se presentan en las plantaciones de cacao (Van & Giller, 2017). En la Figura 28, se observa que estos micronutrientes están más disponibles en concentración y en bases intercambiables en P1 y menor en P2 (ver en capítulo de anexos, apartado 2, Tabla 1). Esto se debe a la Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes; por lo cual, según el “diagrama de Troug” las condiciones óptimas de disponibilidad de nutrientes se encuentran en suelos con pH de 5-6, donde se encuentran el P1 (Ginés & Mariscal, 2002; Van & Giller, 2017).

Dentro de la literatura, se considera que la relación óptima entre K, Ca y Mg es 8 %, 68 % y 24 %. No obstante, si el porcentaje de bases intercambiables de la capacidad total de intercambio está por debajo del 60 %, se debe agregar fertilizante, pero se debe

mantener la proporción óptima entre estos minerales (Van & Giller, 2017). En las Tablas 11 y 12, se puede observar que los porcentajes de Ca en los polígonos P1 y P2 con plantaciones de cacao están por debajo del 68 %; para el K exceden los 8 % requeridos; y para el Mg se encuentran por arriba del 50 %. Comparando el porcentaje encontrado de las bases intercambiables en P1 y P2, se ve una tendencia ligeramente mayor en P1. Por lo tanto, ambas áreas exceden los porcentajes óptimos requeridos, pero con menor exceso en P2.

5.4 Hidrocarburos

Las zonas cercanas a tiraderos de RSU son las más susceptibles a procesos de contaminación, arriesgando la calidad de suelo, subsuelo y de las aguas subterráneas. Es por ello, que se realizó el análisis de las muestras del polígono P3 y la posible contaminación por la presencia de hidrocarburos en el área. Se conoce que a partir de los compuestos químicos usados en hogares, industrias y uso agrícolas para abastecer las necesidades de la población tienen la particularidad de encontrarse en los lixiviados hidrocarburos aromáticos, fenoles e hidrocarburos halogenados, pesticidas entre otros (Gómez Puentes, 2014).

5.4.1 Resultados de HTP y fracción SARA

Los resultados obtenidos de la cuantificación de los HTP (fracciones del petróleo ligera, mediana y pesada) en el suelo con uso agrícola, fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. No obstante, cabe resaltar que a pesar de que la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006, especifica el uso de hexano en la extracción continua para la determinación de HTP en suelos, se pueden usar otros solventes dependiendo de la selectividad de los diversos componentes del petróleo; en algunos estudios se ha comprobado que se adquiere mayor extracción de los HTP con diclorometano (Lache et al., 2011; Martínez et al., 2017); por estas razones en esta investigación empleamos diclorometano (J.R. Beaker). En este sentido, en la *Tabla 15* se muestran los resultados de HTP en la que se observa que todas las muestras contienen hidrocarburos y rebasan los límites máximos permisibles marcados por la normativa mencionada (> 4400 mg/kg).

Tabla 15. Concentraciones de HTP y fracciones SARA para cada muestra del tiradero de RSU con el solvente.

ID	HTP	Fracción SARA				Tóxica Saturados + Aromáticos	Repelente Resinas + Asfáltenos (Fracción pesada)	Danger Toxic for Aromatic
		Saturados (Fracción ligera)	Aromáticos (Fracción media)	Resinas	Asfáltenos			
	mg/kg	Porcentaje en peso del extracto						mg/kg
MB1	11598.84 ± 579.94 ^a	3.46	4.31	3.81	88.42	7.77 ± 0.39 ^b	92.23 ± 4.61 ^a	499.68±24.98
MB2	10700.00 ± 540.00	15.72	3.70	2.88	77.70	19.60 ± 0.97 ^a	80.40 ± 4.03 ^b	299.98±20.00
MB3	11517.08 ± 572.93	1.38	0.00	0.00	98.62	1.07 ± 0.07 ^c	98.93 ± 4.93 ^a	0.00±0.00
MB4	10600.00 ± 530.00 ^b	27.32	2.83	1.92	67.93	29.21 ± 1.51 ^d	70.79 ± 3.49 ^c	300.10±15.01
MB5	11393.16 ± 569.66	17.65	0.88	0.71	80.76	18.53 ± 0.93 ^a	81.47 ± 4.07 ^b	99.94±5.00
MB6	11398.88 ± 569.94	98.25	0.00	0.00	1.75	99.12 ± 4.91 ^e	0.88 ± 0.09 ^d	0.00±0.00
SWc	0.97	NA	NA	NA	NA	0.90	0.91	0.95
P valor	>0.05	NA	NA	NA	NA	<0.05	<0.05	<0.05
HSD	997.67	NA	NA	NA	NA	3.87	6.91	39.97

Donde: letras distintas /a, b, c, d y e) indican diferencias estadísticas significativas (P valor ≤ 0.05); El valor de la prueba Shapiro-Wilk VC = 0.897, NA= No Aplicable.

Se probó el análisis Shapiro Will para comprobar si los datos se distribuyen normalmente para los grupos de resultados de los HTP, fracciones tóxica y repelente ($SW_c > VC$). Posteriormente, se comparó la varianza de los resultados del Polígono 3, para conocer si hay diferencias significativas en las medias con el p -valor del estadístico de la prueba Anova menor al nivel alfa de significación ($\alpha=0.05$). Por ello, se procedió a realizar la Prueba Tukey para comparar todas las combinaciones posibles de pares de muestras para determinar cuáles difieren significativamente entre sí, calculando los intervalos de confianza, los cuales indican si la diferencia es estadísticamente significativa ($X_1-X_2 > HSD$).

En este sentido, autores como Marín et al. (2016) mencionan que las fracciones de Resinas + Asfáltenos tienen la afinidad de ocasionar repelencia en el suelo, lo cual tiene efectos negativos en la capacidad de almacenamiento de agua y contribuye a un desarrollo deficiente de las plantas. Comparando con los valores presentados en la *Tabla 15*, se observa que las muestras que presentarían ese problema serían MB1, MB2, MB3, MB4 y MB5 que contienen porcentajes de asfáltenos + resinas $> 70\%$. No obstante, la muestra MB6 presenta porcentajes de Saturados por encima del 99% y está localizado en la parte más baja del polígono P3, lo que hace entender que se trata de acumulación de lixiviados. Sin embargo, los rellenos sanitarios se deberían ubicar en una depresión en el terreno, cubierta por una membrana inferior impermeable, con sistema de recolección de lixiviados, sistema de recolección de gases y una cobertura superior (Pomposiello et al., 2009); características y componentes con los que no cuenta dicho basurero.

Se ha determinado que el contenido de las fracciones saturadas de diversos petróleos se clasifica como petróleos ligeros. Por otro lado, las fracciones de Asfáltenos + Resinas se agrupan para los crudos más pesados (Vázquez et al., 2021). En este sentido, el análisis SARA (ver *Tabla 15*) muestra que las principales fracciones en los extractos son los correspondientes a la fracción pesada ($70-99\%$), los cuales son más afines a los solventes halogenados según lo reportado por Morales et al. (2020) e Yzquierdo et al. (2022).

Adams et al. (2008), reportan que en concentraciones muy bajas de HTP (~2500 mg/kg) de derrames antiguos e intemperizados en suelos, se observan afectaciones en el crecimiento de la vegetación e impactos en varios parámetros físico-químicos de fertilidad, como en la CC, temperatura, CIC, repelencia al agua, y porosidad. En este sentido, comparando los HTP (> 10 800 mg/kg, ver *Tabla 15*) y según lo reportado por los autores antes mencionados, esto podría estar ocurriendo en el P3. Esto se pudo comprobar con los resultados del análisis de fertilidad del suelo del P3, ya que los parámetros físicos y químicos no son favorables para el desarrollo de la actividad agrícola. Sin embargo, al presentarse escorrentía superficial; esto derivado de la repelencia al agua del suelo como consecuencia de los residuos contaminantes de hidrocarburos pesados, están generando arrastre de los contaminantes de la capa superficial del suelo (Marín et al., 2016).

Por lo anterior, se realizó la evaluación del método WDPT para calcular el tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo (*Tabla 16*). Además, cabe mencionar que diversos autores han comprobado que se considera a este método como la prueba hidrológica más cercana al proceso natural de infiltración de agua en el suelo, indicando que tiempos de infiltración se aumentan en suelos con repelencia elevada (Aguilar Orea, 2013; Marín et al., 2016).

Tabla 16. Resultados de repelencia al agua del suelo (tiempo de penetración de una gota de agua) determinada por el método WDPT.

ID	Res+Asf	HTP (mg/kg)	WDPT (s)
MB1	92.23	11598.84	51.90
MB2	80.40	10800.00	48.66
MB3	98.93	11458.54	51.34
MB4	70.79	10600.00	47.81
MB5	81.47	11393.16	51.08
MB6	0.88	11398.88	51.11

Donde: Res+Asf: Resinas + Asfáltenos, HTP: Hidrocarburos Totales del Petróleo, WDPT: Water Drop Penetration Time.

Según la clasificación que realizó King (1981), el suelo que es contaminado con hidrocarburo pesado se considera ligeramente repelente con el tiempo de penetración de la gota de agua de 39-59 s y con tiempos ≥ 60 s se clasifican como fuertemente

repelente. Por estas razones, se considera que el suelo del P3 es ligeramente repelente según las pruebas realizadas.

5.4.2 Análisis por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros resultantes del análisis FTIR (*Figura 30*), confirman que los extractos presentan señales de grupos funcionales polares: carbonilo-aromático (ArCOR) en $\sim 1728\text{ cm}^{-1}$, sulfonilos ($\text{O}=\text{S}=\text{O}$) en $\sim 1088\text{ cm}^{-1}$ y éteres (COC) en $\sim 1018\text{ cm}^{-1}$, las cuales coinciden con los reportes de Meléndez et al. (2012) y Guzmán-Osorio et al. (2020) Además, se observan las bandas correspondientes a los grupos funcionales saturados: Sat1 en $\sim 1358\text{ cm}^{-1}$, Sat2 en $\sim 1431\text{ cm}^{-1}$, Sat3 en $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$ y Sat4 en $\sim 2920\text{ cm}^{-1}$, reportadas por estos mismos autores.

Así mismo, las señales coinciden con otros reportes en los que se analizaron derrames de hidrocarburos intemperizados, pero lo asocian a fracciones resinas+polares y saturados: ArCOR en 1700 cm^{-1} , COC en $\sim 1021\text{ cm}^{-1}$, $\text{O}=\text{S}=\text{O}$ en $\sim 1152\text{ cm}^{-1}$, Sat1 (CH_2) $\sim 1457\text{ cm}^{-1}$ y Sat2 (CH_3) en 1376 cm^{-1} . Es importante señalar que estos autores argumentan que las bandas pueden desplazarse entre un derrame de hidrocarburos reciente y uno intemperizado (Morales et al., 2016).

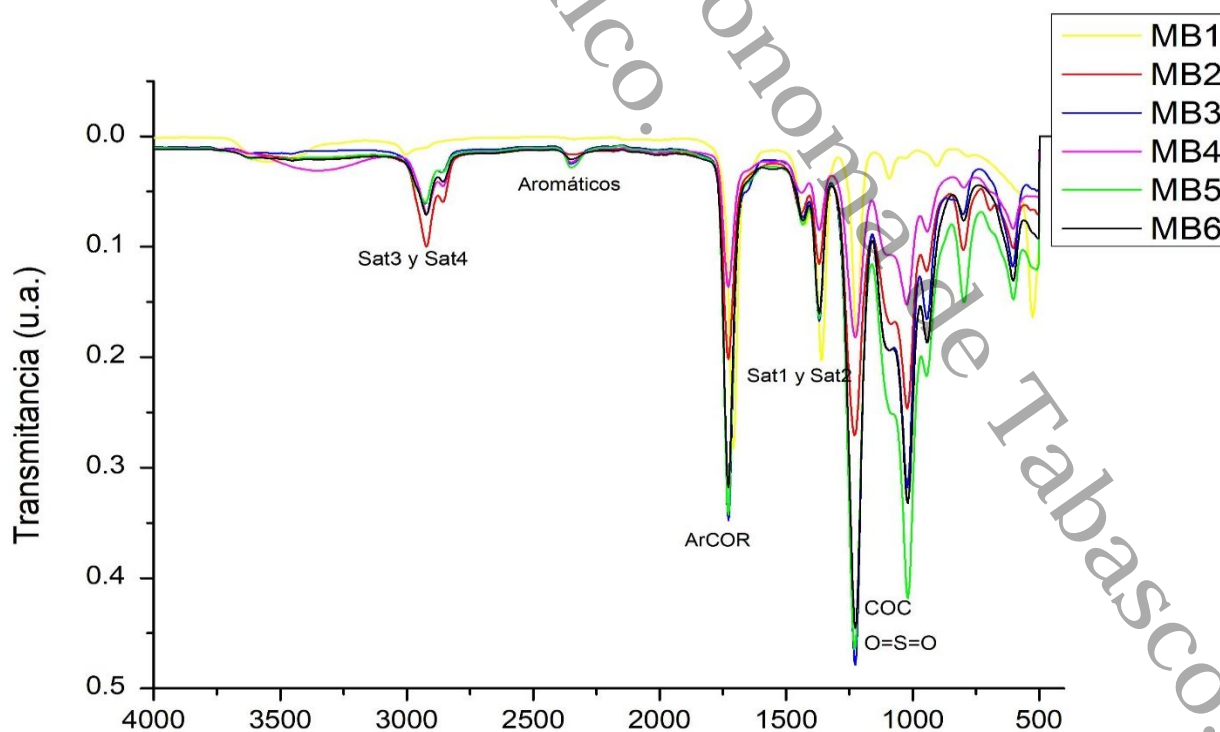


Figura 30. FTIR de extractos de HTP con solvente diclorometano del sitio P3 (muestras del Tiradero de RSU).

5.4.3 Lixiviados en extracto proceso de extracción de contaminantes tóxicos (PECT)

Los resultados referentes a los niveles de contaminación en el suelo por los residuos sólidos urbanos; los cuales se examinaron detalladamente con la finalidad de demostrar las formas de transmisión de contaminación del suelo hacia las aguas subterráneas ocasionados por los lixiviados. Además, se considera que el Tiradero de RSU es de suma peligrosidad, por su ubicación geográfica ya que en sus alrededores existen terrenos dedicados a la agricultura, que con la lluvia y escorrentía pueden ser afectados.

En este sentido, los resultados obtenidos de las concentraciones de los contaminantes de Hidrocarburos Pesados en el P3 están por debajo de 15 mg/L, siendo este, el límite máximo permisible de hidrocarburos en agua dulce según la norma oficial mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003. Esto indica, que no hay presencia de lixiviados e infiltración de contaminantes en forma vertical a través de los horizontes del suelo que pudiera generar contaminación de los cuerpos de agua subterráneas. No obstante, puede ocurrir escorrentía superficial por el grado de repelencia al agua del suelo en la que se encontró la zona de estudio y erosión de la capa superficial del suelo por el constante lavado de las gotas de agua de lluvias, entre otros factores (ver *Tablas 15 y 16*).

5.5 Cuantificación de metales pesados por ICP-OES

5.5.1 Validación de los resultados

Los parámetros relacionados con la validación del método son la linealidad, repetibilidad, reproducibilidad y robustez. Solo se muestran la evaluación de los elementos que están por encima de los límites permisibles.

5.5.1.1 Linealidad y sensibilidad

En la *Tabla 17*, se presentan los datos de las curvas de calibración para los elementos que exceden los límites máximos permisibles contenidos en las muestras. El coeficiente de correlación se busca que sea cercano a 1 para evaluar la linealidad. A lo que respecta a la sensibilidad del equipo se analiza a través de la pendiente de la curva de calibración.

Tabla 17. Datos de las curvas de calibración para los elementos normados con límites máximos permisibles obtenidos en el ICP-OES.

Elemento	Concentración de estándares	r ²	Pendiente
	(ppm)		
As	0.1, 0.5, 1, 5 y 10	0.9996	1349.9870
Ag		0.9985	31883.4826
Ba		0.9997	140475.4820
Be		0.9999	264358.8670
Ca		0.9997	34344.1920
Cd		0.9999	43624.2547
Cr		0.9997	21721.7688
Cu		0.9999	22001.0398
Fe		0.9998	54958.0956
K		0.9999	208789.5180
Mg		0.9995	89120.8968
Mn		0.9995	465038.3950
Na		0.9958	796383.6620
Ni		0.9999	3477.8169
Pb		0.9999	3065.4527
Se		1.0000	1080.0782
Tl		1.0000	1098.8320
V		0.9998	57112.0661
Zn		0.9998	36347.3764

Nota: r²: coeficiente de correlación.

Tabla 18. Límites de detección, de cuantificación y valores de desviación estándar obtenidos para ICP-OES.

Elemento	SD	LDE mg/L	LDM mg/kg	LOQ
As	0.0087	0.0262	2.3556	0.0872
Ag	0.0032	0.0096	0.8640	0.0320
Ba	0.0002	0.0006	0.0540	0.0020
Be	0.0002	0.0006	0.0540	0.0020
Ca	0.0009	0.0027	0.2430	0.0090
Cd	0.0009	0.0027	0.2430	0.0090
Cr	0.0017	0.0051	0.4590	0.0170
Cu	0.0035	0.0104	0.9352	0.0346
Fe	0.0006	0.0018	0.1620	0.0060
K	0.0013	0.0039	0.3510	0.0130
Mg	0.0002	0.0006	0.0540	0.0020
Mn	0.0001	0.0003	0.0271	0.0010
Na	0.0003	0.0009	0.0810	0.0030
Ni	0.0021	0.0063	0.5670	0.0210
Pb	0.0077	0.0232	2.0858	0.0773
Se	0.0175	0.0525	4.7250	0.1750
Tl	0.0061	0.0183	1.6470	0.0610
V	0.0016	0.0048	0.4320	0.0160
Zn	0.0003	0.0009	0.0810	0.0030

Donde: SD: desviación estándar, LDE: límite de detección del equipo, LDM: límite de detección del método, LOQ: límite de cuantificación

5.5.1.2 Exactitud

A continuación, en la *Tabla 19* se muestra los resultados experimentales obtenidos por el equipo de la concentración de los elementos presentes en el suelo de referencia "Montana I" con su respectivo RSD; así como, el porcentaje de recuperación con respecto al valor certificado, los cuales se encuentran dentro del rango de 71 al 94 %.

Tabla 19. Porcentajes de recuperación en el material de referencia “suelo Montana I” para cada metal analizado.

Valor certificado (ppm)		λ (nm)	Valor experimental (ppm)	RSD (Concentración)	Recuperación (%)
As	1540	188.979	1287.3534 \pm 4.9036	0.3729	83.5944
Cu	3420	327.393	2725.1081 \pm 29.7542	1.0918	79.6815
Fe	43200	238.196	40899.1781 \pm 134.5717	0.3290	94.6740
Mn	2140	257.610	1726.3707 \pm 4.0914	0.2370	80.6715
Pb	5520	220.355	4465.4363 \pm 63.2164	1.4157	80.8956
Zn	4180	206.199	2856.5037 \pm 27.2028	0.9523	68.3374
Ba	792	233.524	564.8799 \pm 7.8799	1.2404	71.3232
Cd	12.3	226.502	37.0706 \pm 0.0268	0.0723	78.0124

Nota: λ : longitud de onda característica de cada elemento, RSD: desviación estándar relativa.

5.5.1.3 Repetibilidad

Los resultados de la lectura de la concentración del estándar de 0.5 ppm, leídos en lotes de cada 15 muestras durante el análisis se indican en la *Tabla 20*. Asimismo, se presentan las concentraciones obtenidas durante la lectura del estándar para las 4 veces para los elementos prioritarios en esta evaluación de riesgos y toxicidad que exceden los límites permisibles en el uso de suelo agrícola.

Tabla 20. Lectura de la concentración del estándar de 0.5 ppm para evaluar la repetibilidad.

Elemento	Repeticiones de la lectura del estándar de 0.5 ppm				Promedio (ppm)	SD	RSD
	1	2	3	4			
As	0.56	0.57	0.60	0.60	0.58	0.01	1.05
Ag	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21	0.00	1.90
Ba	0.52	0.50	0.51	0.51	0.51	0.00	0.93
Be	0.25	0.09	0.06	0.04	0.11	0.00	2.14
Cd	0.47	0.38	0.36	0.36	0.39	0.01	1.33
Cu	0.50	0.45	0.44	0.43	0.46	0.00	0.65
Fe	0.75	0.67	0.69	0.75	0.71	0.00	0.59
Mn	0.65	0.66	0.67	0.67	0.66	0.01	0.88
Ni	0.04	-0.15	-0.20	-0.21	-0.13	0.00	4.94
Pb	0.49	0.45	0.46	0.46	0.46	0.01	1.65
Se	0.54	0.54	0.54	0.56	0.55	0.01	1.86
Tl	0.19	-0.05	-0.11	-0.12	-0.02	0.00	2.89
V	0.57	0.59	0.59	0.60	0.59	0.01	1.06
Zn	0.39	0.31	0.30	0.30	0.32	0.00	1.36

Nota: λ : longitud de onda característica de cada elemento, SD: desviación estándar, RSD: desviación estándar relativa.

5.5.2 Análisis y discusión de los resultados de los análisis por ICP-OES

Los resultados obtenidos de la concentración de cada elemento presente en las muestras colectadas de suelo que exceden los límites máximos permisibles y los que están por debajo de este valor, cumpliendo con su validación, se observan en las *Tablas 21, 22 y 23*. Se analizaron los siguientes elementos: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sr, Ti, Tl, V y Zn en el equipo ICP-OES, sin embargo, solo se presenta el análisis de 15 elementos que están limitados por normas de calidad ambiental de suelos. De acuerdo con la selectividad de los resultados, solo se tomaron los datos con una desviación estándar relativa (RSD) menor a 10 %, obtenidos por la lectura de la concentración y se siguieron las recomendaciones de la IUPAC. En color rojo se denotan las concentraciones que están por arriba del límite máximo permisible normado.

Tabla 21. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P1.

ID	Límite de detección del método	As	Pb	Cd	Ba	Be	Cu	Tl	Ag	Ni	Se	V	Cr	K	Fe	Mn
		2.3 5	2.0 8	0.2 4	0.05	0.0 5	0.93	1.6 4	0.8 64	0.56	4.7 2	0.43	0.45	0.35	0.16	0.02 71
M1AG H1	Concentración (mg/kg)	N/ D	N/ D	7.2 7	262. 22	0.3 7	42.8 59	N/ D	<DL	101. 58	N/ D	75.6 5*	153. 29	9317.56	N/D	654. 56
M1AG H2		N/ D	N/ D	N/ D	278. 63	N/ D	27.0 3	N/ D	<DL	N/D	N/ D	68.9 0	N/D	9951.32	38709. 02	847. 40
M2AG H1		N/ D	N/ D	7.2 5	184. 92	N/ D	52.2 7	<D L	<DL	89.6 1*	N/ D	60.6 2	121. 22	5317.37	32804. 40	728. 42
M2AG H2		N/ D	N/ D	7.7 9	180. 85	N/ D	33.8 9	N/ D	<DL	67.1 7	N/ D	61.3 6	128. 38	3980.88	35124. 96	620. 97
M3AG H1		4.2 0	7.7 0	7.5 5	238. 22	0.2 5	48.0 7	<D L	<DL	84.6 9	N/ D	68.9 7	143. 82	9326.91	34725. 04	410. 12
M3AG H2		4.8 6	N/ D	7.7 5	180. 72	N/ D	31.5 0	N/ D	<DL	51.3 5	<D L	58.3 4	126. 49	3746.68 408	34601. 66	463. 56
M4AG H1		N/ D	6.4 2	7.4 1	252. 27	0.2 2	35.3 8	N/ D	<DL	76.0 8	N/ D	73.3 0	153. 84	10290.9 4	36372. 34	551. 38
M4AG H2		N/ D	3.8 1	7.8 8	251. 92	N/ D	31.4 2	N/ D	<DL	39.7 9	N/ D	75.4 1*	159. 40	9571.36	N/D	737. 49
M5AG H1		N/ D	N/ D	7.3 5	177. 70	N/ D	57.4 9	<L D	<DL	73.4 8	N/ D	57.3 6	120. 89	5061.54	32537. 74	430. 33
M5AG H2		N/ D	N/ D	8.3 0	270. 98	<D L	39.3 5	N/ D	<DL	N/D	N/ D	80.2 2	163. 59	10690.6 2	39058. 85	510. 80
M6AG H1		N/ D	N/ D	8.0 1	227. 30	N/ D	30.7 0	N/ D	<DL	52.4 1	<D L	67.9 5	145. 96	9611.44	35589. 68	522. 94
M6AG H2		N/ D	6.0 8	8.3 2	184. 40	<D L	30.3 2	<L D	<DL	39.2 6	N/ D	70.6 9	148. 72	5322.21	38793. 95	674. 04

Donde= N/D: no determinado debido a que la muestra presentó RSD > 10%, *: significa que se acerca al límite máximo permisible, λ : longitud de onda.

Tabla 22. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P2.

		As	Pb	Cd	Ba	Be	Cu	Tl	Ag	Ni	Se	V	Cr	K	Fe	Mn
ID	Límite de detección del método	2.3 5	2.0 8	0.2 4	0.05	0.05 40	0.93	1.6 4	0.8 6	0.56	4.7 2	0.43	0.45	0.35	0.16	0.02
M10 H1	Concentración (mg/kg)	7.5 8	N/ D	7.4 0	186. 58	<LD	35.6 7	<L D	<L D	N/D	N/ D	57.2 0	114. 30	7001. 17	28634.8 5	362. 33
M10 H2		N/ D	N/ D	7.5 5	150. 26	<LD	21.1 3	N/ D	<L D	<LD	N/ D	62.0 6	112. 01	4784. 19	31521.1 85	371. 43
M20 H1		N/ D	N/ D	7.3 6	139. 38	<LD	43.6 1	N/ D	<L D	9.53	N/ D	50.8 7	95.7 4	4602. 53	27240.8 2	362. 03
M20 H2		8.0 3	N/ D	7.3 5	143. 71	<LD	22.9 5	N/ D	<L D	<LD	ND	58.2 2	112. 60	4200. 27	30406.4 6	397. 26
M30 H1		N/ D	N/ D	7.5 5	195. 10	<LD	32.2 5	<L D	<L D	<LD	ND	63.9 2	133. 52	7688. 47	31952.4 8	381. 47
M30 H2		8.1 7	N/ D	7.2 5	128. 49	<LD	19.8 5	N/ D	<L D	N/D	ND	56.2 0	107. 98	2896. 77	31412.4 0	433. 30
M40 H1		8.2 5	N/ D	7.1 5	160. 52	<LD	ND	N/ D	<L D	N/D	N/ D	57.7 7	108. 82	6173. 66	27041.7 5	302. 95
M40 H2		7.5 8	N/ D	7.2 2	125. 61	<LD	17.3 2	N/ D	<L D	<LD	N/ D	52.4 1	97.4 6	2032. 47	30561.5 3	476. 61
M50 H1		N/ D	N/ D	7.0 3	155. 10	<LD	30.4 0	N/ D	<L D	N/D	N/ D	54.9 1	106. 66	6757. 42	26115.2 4	275. 46
M50 H2		8.9 1	N/ D	7.2 1	166. 08	<DL	20.3 0	N/ D	<L D	N/D	N/ D	65.2 8	131. 28	5916. 25	30817.5 6	392. 01
M60 H1		N/ D	N/ D	7.0 3	120. 40	<DL	38.8 0	N/ D	<L D	11.6 5	N/ D	45.8 3	90.5 5	3054. 73	26085.5 8	323. 81
M60 H2		N/ D	N/ D	N/ D	138. 45	<LD	19.3 2	N/ D	<L D	N/D	N/ D	56.1 2	107. 00	N/D	N/D	N/D

Donde= N/D: no determinado debido a que la muestra presentó RSD > 10%, *: significa que se acerca al límite máximo permisible, λ : longitud de onda.

Tabla 23. Resultados experimentales del contenido de metales pesados en las muestras colectadas de suelo que exceden el límite máximo permisible por las normas para el polígono P3.

		As	Pb	Cd	Ba	Be	Cu	Tl	Ag	Ni	Se	V	Cr	K	Fe	Mn
ID	Límite de detección del método	2.3 5	2.08	0.2 4	0.05	0.0 5	0.93	1.6 4	0.8 6	0.5 6	4.7 2	0.43	0.45	0.35	0.16	0.02
MB1 H1	Concentración (mg/kg)	4.7 1	N/D	5.8 2	43.5 6	<L D	8.19	<L D	<L D	<L D	N/ D	50.9 2	42.9 7	897.3 5	19727. 70	259. 60
MB1 H2		5.3 2	N/D	4.9 2	38.1 5	<L D	7.23	N/ D	<L D	N/ D	N/ D	24.0 7	32.8 6	672.7 3	11158. 86	165. 77
MB2 H1		5.1 0	N/D	5.7 1	88.6 5	<L D	12.5 9	N/ D	<L D	N/ D	N/ D	41.5 1	46.7 8	2156. 74	18843. 93	260. 28
MB2 H2		N/ D	12.0 7	6.1 5	286. 63	<L D	14.9 0	N/ D	<L D	<L D	N/ D	47.8 6	65.8 5	2783. 58	21933. 45	306. 54
MB3 H1		N/ D	N/D	6.1 7	90.6 6	<L D	13.7 5	N/ D	<L D	<L D	N/ D	51.4 9	57.5 6	2133. 73	22428. 58	297. 45
MB4 H1		7.9 8	N/D	6.2 3	100. 43	<L D	13.8 2	N/ D	<L D	<L D	N/ D	48.0 1	86.0 6	2294. 50	24889. 18	353. 38
MB4 H2		N/ D	N/D	5.3 1	57.2 5	<L D	22.0 2	N/ D	<L D	<L D	N/ D	38.4 9	40.3 2	1994. 25	17338. 79	223. 32
MB5 H1		N/ D	N/D	6.2 0	78.5 8	<L D	16.8 4	N/ D	<L D	<L D	N/ D	47.8 2	63.2 3	2049. 75	23163. 61	355. 28
MB5 H2		N/ D	N/D	5.4 3	61.8 0	<L D	10.9 2	N/ D	<L D	<L D	N/ D	47.7 6	39.9 7	1941. 75	19915. 01	287. 09
MB6 H1		N/ D	N/D	6.6 3	115. 20	<L D	16.4 8	N/ D	<L D	<L D	N/ D	49.8 4	101. 96	2331. 96	29095. 15	431. 52
MB6 H2		N/ D	N/D	5.5 8	69.7 1	<L D	9.25	<L D	<L D	N/ D	N/ D	37.4 6	42.1 9	2240. 35	16858. 38	231. 65

Donde= N/D: no determinado debido a que la muestra presentó RSD > 10%, *: significa que se acerca al límite máximo permisible, λ : longitud de onda.

Es muy importante mencionar que las sustancias contaminantes pocas veces se dispersan en concentraciones uniformes en el ambiente, cuyo destino y medio de dispersión se dan en relación con el tiempo y el espacio, afectando las interacciones de la población y la biodiversidad como entes receptores (Cano, 2021), este tipo de escenario se presenta en la contaminación por el uso de agroquímicos. Esto se ve reflejado en los resultados obtenidos (*Tabla 21*), y se puede observar que el punto de muestreo M1AGH1 excede el límite permisible para el Ni de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT 2000 (SEMARNAT, 2000) para considerarse un elemento tóxico en el suelo según la tolerancia de los cultivos en rangos peligrosos, pero en el punto de muestreo M2AGH2 está cerca del límite. Sin embargo, estas concentraciones de Ni superan el doble del límite permitido por la Norma de Ecuador de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados de Ecuador para uso de suelo agrícola (Norma Oficial de Ecuador, 2015).

La presencia de Ni en el suelo se atribuye al uso productos de latonería y pintura, piezas en talleres mecánicos, fabricación de baterías, originado también por los combustibles fósiles de vehículos automotores, plantas termoeléctricas, motores diesel, entre otras fuentes (Machado et al., 2008). Por estas razones, es importante una continua actualización de las normas mexicanas para la calidad de suelos, ya que en el país se manejan límites demasiados bajos en comparación con normas internacionales (véase *Tabla 4*).

Los resultados obtenidos de la concentración de Cd en las muestras del P1 (*Tabla 21*), P2 (*Tabla 22*) y P3 (*Tabla 23*), exceden los límites máximos permisibles impuestos por: la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT 2000 (SEMARNAT, 2000), Norma de Ecuador y la Norma de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de Perú. Según la literatura, las fuentes de contaminación asociadas a la presencia de Cd son derivadas de las actividades de aplicación de enmiendas procedentes de residuos municipales para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo y el uso de fertilizantes fosfatados, convirtiéndose en metal bioacumulable por la aplicación continua de estos (Bravo et al., 2014). Así mismo, la presencia de este elemento en el polígono en los lixiviados del suelo del basurero podría asociarse a varios factores como la edad,

tipo de residuo, presencia de materia coloidal en los lixiviados, entre otros (Gómez, 2014).

Además, se encontró que los puntos M1AGH1 y M4AGH2 se encuentran muy próximos a los límites máximos permisibles para el V según la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para uso de suelo agrícola, residencial y comercial, y solo se observó que la muestra M5AGH2 excede este límite máximo permisible. El vanadio en concentraciones de 10 mg/kg o más, se considera tóxico para las plantas terrestres (Alvarado, 2016). Por lo cual, estas concentraciones de este elemento en los puntos de muestreo del P1 indican que las plantas podrían estar sobreexpuestas a este elemento.

Estos resultados indican que existe un riesgo de fitotoxicidad y para la tolerancia tóxica de los cultivos de cacao. Por lo tanto, se recomienda tomar medidas de uso de productos de origen orgánico para la restauración y no generar concentraciones de MP en el suelo. Asimismo, esto evitará los problemas de contaminación que a largo plazo contaminen las aguas por lixiviación y que pueden afectar la salud de la población que consume la semilla de cacao.

Los MP son elementos naturales que se encuentran en varios niveles de fondo y que no generan daños al medio ambiente, originado por los lechos rocosos. Sin embargo, son persistentes y no pueden eliminarse del medio ambiente, generando problemas cuando su disponibilidad es alta debido a altos niveles de fondo o a la actividad humana (Greger, 2004). Sin embargo, la disponibilidad de MP en el suelo depende principalmente por el contenido y tipo de arcillas, la CIC (Mendoza et al., 2021). También depende de las propiedades que conforman a este medio como el pH del suelo, el contenido de materia orgánica, la fuerza iónica de la solución del suelo, los óxidos de Mn y Fe, el potencial redox y la naturaleza de las superficies absorbentes del suelo (Cornejo et al., 2012).

El pH de suelos ácidos ligeramente contaminados con MP está entre 5-6 y conforme el pH disminuye la contaminación se incrementa (Arévalo et al., 2016). Esto se debe a que el pH ácido del suelo incrementa la disponibilidad del metal debido a que el ion H^+ tiene una afinidad alta por las cargas negativas de los coloides, compitiendo con los iones metálicos por estos sitios y por lo tanto se pueden liberar metales (Cornejo et al., 2012; Greger, 2004). En este sentido, según el análisis físico-químicos del suelo del P1 se

clasificó como moderadamente ácido, medio-alto contenido de MO y alto contenido de óxidos de Mn y Fe, constituido por alto porcentaje de limos+arcillas; por tanto, estos factores facilitan la absorción y retención en la capa superficial del suelo de Ni, V y Cd. Por otro lado, con respecto al P2 el medio-alto contenido de MO, alto contenido de Mn y Fe, y el suelo según su clasificación fuertemente ácidos, atribuye a la disponibilidad de estos metales, encontrándose Cd en la mayoría de las muestras. La inmovilización de los MP y su largo tiempo de residencia en el suelo se debe generalmente por el alto contenido de arcilla, alto porcentaje de MO, donde estos metales se unen a los ácidos húmicos o fúlvicos y el pH (Greger, 2004).

El Cd, es un elemento no esencial para las plantas, pero es capaz de ser absorbido por las raíces y se transporta hacia las diferentes partes de la planta. Sin embargo, altas concentraciones de éste ocasionan toxicidad en las plantas (Castebianco, 2018; Florida et al., 2019).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

VI. CONCLUSIONES

Los polígonos de muestreo P1 y P2 por su ubicación topográfica y ser zonas bajas e inundables, son afectados por los flujos de agua de escorrentía provenientes del tiradero a cielo abierto de RSU. Así mismo, los puntos de mayor acumulación de contaminantes son las zonas más bajas por el drenaje y zonas de inundación que son los polígonos P1 y P2, y por estar compuestos por partículas de limos y arcillas.

Las condiciones de acidez difieren para cada tipo suelo. En el polígono P1, la acidez se debe a la aplicación de agroquímicos fosfatados y es la causa del aumento del pH y la disponibilidad de nutrientes en el suelo adquiridos por los fertilizantes. En contraste, la aplicación de los abonos orgánicos en el P2 disminuye el pH y asegura buena disponibilidad de nutrimentos para el cultivo. El polígono P2 tiene menor porcentaje de contenido de MO en comparación con el P1, por tanto, la acidez está atribuida a el tratamiento de suelo. Por esto, P1 posee un pH ligeramente ácido y el del P2 es fuertemente ácido. Siendo el suelo fuertemente ácido donde en condiciones óptimas, se desarrollan las plantas de cacao, siendo P2 el mejor sitio para las plantaciones de cacao.

El polígono P1 tiene mayor porcentaje de partículas finas de arcillas, por esta razón absorbe mayores nutrientes, CIC y aumento en la captación de Metales Pesados (MP) derivados por el uso de fertilizantes y agroquímicos. En cambio, P2 está conformado por limos y a pesar de su bajo porcentaje a intercambio catiónico, las plantas de cacao tienen un mejor desarrollo por lo observado en campo.

Se determina que mayor porcentaje de partículas arcillosas y MO beneficia a tener mayor CC y CIC, mejorando la estabilidad del suelo y mayor producción agrícola. Sin embargo, esto propicia a que también se retengan contaminantes derivados de los agroquímicos usados en el área, todo esto es asociado al contenido textural del suelo del P1.

Las concentraciones de HTP (>10 800 mg/kg), esta concentración indica que derrames antiguos e intemperizados en suelos del polígono P3, está afectando el crecimiento de la vegetación, la CC, CIC, repelencia al agua, y la porosidad. Se considera que la presencia de una escorrentía superficial es ocasionada por una ligera repelencia al agua del suelo como consecuencia de la presencia de los residuos contaminantes de

hidrocarburos pesados y erosión de la capa superficial del suelo por el constante lavado de las gotas de agua de lluvias por su elevación topográfica del polígono.

Se sugiere reducir el uso de agroquímicos e implementar el uso de productos de origen orgánicos, y evitar el riesgo de intoxicación de los agricultores y contaminación del recurso no renovable "suelo".

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

VII. REFERENCIAS

- Abad Peña, E. (2018). *Análisis multielemental de minerales lateríticos pro ICP-OES. Efectos matriz, su reducción y posibles mecanismos*. [Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Químicas]. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales. Universidad de La Habana. Facultad de Química. Departamento de Química Analítica.
- Adams, R. H., ZaVala-Cruz, J., & Morales-García, F. (2008). *Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación*. 33(ISSN 0378-1844), 483–489.
- Adimalla, N. (2019). Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 173–190. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00324-4>
- Adimalla, N. (2020). Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 59–75. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00270-1>
- Aguilar Orea, G. F. (2013). *Variación de la repelencia al agua de los suelos en función de la profundidad, del contenido de humedad, de la posición topográfica y de la cobertura vegetal, en la cuenca del río Los Gavilanes, Veracruz* [Tesis para obtener grado de Licenciatura en Geografía]. Universidad Veracruzana. Facultad de Economía.
- Aguirre, M. A. (2015). Avances en la preparación de muestras líquidas para un análisis elemental con técnicas espectrométricas basadas en plasma: ICP-OES, ICP-MS Y LIBS [Tesis para la obtención de título de Doctor en Química]. En *Tesis*. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Química Analítica. Nutrición y Bromatología.
- Akbar, K. F., H.G. Hale, W., D. Headley, A., & Athar, M. (2006). Heavy Metal Contamination of Roadside Soils of Northern England. *Soil & Water Research*, 1(4), 158–163. <https://doi.org/10.17221/6517-SWR>
- Almagro Fernández, B., Canals Hernández, A., & Gañán-Calvo, A. M. (2007). *Procedimiento y dispositivo para la producción de aerosoles líquidos y su uso en espectrometría analítica (atómica y de masas)*.
- Alvarado Gámez, A. L. (2016). *Determinación electroquímica de vanadio y tungsteno en aguas con electrodos serigrafados modificados con nanomateriales y enzimas*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Burgos. Departamento de Química. Área de Química Analítica.
- Amézquita, E. (1999). *Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza* (1a ed., Vol. 20, pp. 73–86). Palmas.
- Arévalo Gardini, E., Obando Cerpa, M. E., Zúñiga Cernades, L. B., Arévalo Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81–89. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arguijo Portillo, N. V., Guerrero Peña, A., Domínguez Rodríguez, V. I., Carrillo Ávila, E., & Zavala Cruz, J. (2019). Calibration models for the spectrophotometric quantification of total oil hydrocarbons in soil. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 469–479. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.17>

- Azañero Aquino, L. (2016). *Calidad del suelo en tres sistemas de uso en la localidad de río espino – monzón*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva .
- Balcazar Rueda, I. R., Gómez Rodríguez, A. C., García Ocaña, J. A., & López Ocaña, G. (2020). Effects of pollutants in soil by an open-heavy dump in Tabasco. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 4(1), 1–18. <https://doi.org/10.19136/Jeeos.a4n1.3473>
- Baver, L. D., Gardner, W. H., & Gardner, W. R. (1973). *Física de suelo*. UTEHA.
- Beltrán Pineda, M. E. (2014). Comparative study of total microbial populations and solubilizers of phosphate in soils of paramo cultivated with potato (*solanum tuberosum*) in Ventaquemada - Boyacá. *Investigación, Innovación, Ingeniería*, 1(2), 56–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.24267/23462329.65>
- Brady, N. C., & Weil, R. W. (1999). *The nature and properties of soils* (12a ed.). Prentice Hall Publishers.
- Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción ecológica*, 24(1), 35–42.
- Bravo Inclán, L., Saldaña Fabela, P., Izurieta Dávila, J., & Mijangos Carro, M. (2009). *La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo*.
- Bravo Realpe, I. del S., Arboleda Pardo, C. A., & Martín Peinado, F. J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Ciencias del suelo. Acta agronómica*, 63(2), 164–174.
- Buenaer Ortiz, M. T., & Rodríguez Araujo, E. A. (2016). Determinación de la estabilidad de agregados del suelo en diferentes agroecosistemas del departamento norte de Santander. *Sociedad Colombiana del suelo. Suelos Ecuatoriales*, 46(1 y 2), 42–50.
- Cajuste, L. J., Alarcón, A. V., Grabach, C. D. S., González, G. A., & De la Isla, M. D. L. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 35(3), 267–274.
- Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (1998). Hormesis as a Biological Hypothesis. *Environ Health Perspectives*, 106(1), 357–362. <http://ehpnet11.niehs.nih.gov/docs/1998/Suppl-1/357-362calabrese/abstract.html>
- Cano, J. (2021). Heavy metals and soil fertility at N Channel irrigation, Puno, Peru. *Manglar*, 18(4), 419–426. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.054>
- Carbajal Pita, L. H. Z., & Nolasco Estrella, B. A. (2011). *Análisis de Silicio orgánico por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) en muestras de aceite crudo*. [Tesis de grado]. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.
- Casas Flores, R. (2012). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas* (1a ed.). Ediciones Paraninfo, S.A.
- Castebianco, J. A. (2018). Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation. *Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 21–35. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>

- Cepeda Dovala, J. M. (1991). *Química de suelos* (Primera edición). Editorial Trillas.
- Chipana Paulino, D. D. (2016). *Desarrollo y validación de un método analítico para valoración de metronidazol, clotrimazol y lidocaína clorhidrato en óvulos vaginales, por cromatografía de líquidos (HPLC)* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Farmacia y Bioquímica.
- Cina, M. (2017). *Evaluación de métodos de mineralización de muestras y análisis multielemental de granos de maíz mediante espectrometría de emisión atómica con plasma generado por microondas (MPAES)*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de La Pampa. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Ciudad, M. (2011). *Determinaciones de macro y microconstituyentes en el suero y su disponibilidad nutricional por ICP OES*.
- CNH. (2023). *Atlas geológico. Cuencas del sureste-cinturón plegado de la sierra de Chiapas*.
- Compañía Nacional de Chocolates. (1988). *Manual para el cultivo de cacao* (1988 La compañía, Ed.; Tercera edición). EDINALCO.
- CONAGUA. (2020). *Subdirección general técnica gerencia de aguas subterráneas. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Samaria-Cunduacán (2703), Estado de Tabasco*.
- Coras Merino, P. M. (1987). *Características y propiedades físicas del suelo en relación con el riego* (D. G. de D. C. D. de P. D. de I. 2003 Universidad Autónoma Chapingo, Ed.; Primera edición). Editorial Gaceta.
- Cordero, C. Y. (2018). Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí [Tesis para obtener grado de Maestro en Geociencias Aplicadas]. En *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT)*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Cornejo Oviedo, F. M., López Herrera, M., Beltrán Hernández, R. I., Acevedo Sandoval, O. A., Lucho Constantino, C. A., & Reyes Santamaría, M. I. (2012). Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 873–880.
- Cremona, V. M., & Enriquez, A. S. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>
- Cruz Garritz, D., Chamizo, J. A., & Garritz, A. (1986). Estructura atómica. Un enfoque químico. En D. C. J. A. ; G. Andoni. E. A. de México. CRUZ (Ed.), *Capítulo 3. Espectros atómicos, modelo de Bohr y vieja teoría cuántica*. Universidad Autónoma de México. USA, Adison Wesley Iberoamericana, SA.
- Dávila Sámano, A. R., Castillo Suárez, L. A., Linares Hernández, I., García Colindres, M. A., & Martínez Miranda, V. (2024). Efectos ambientales en el aire, agua y suelo de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario del Estado de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 3(91). <https://doi.org/https://doi.org/10.33064/iycuaa2024914520e4520>

- Dekker, L. W., & C.J. Ritsema. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507–2517.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/94WR00749>
- Delgado Londoño, D. M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos (revista descontinuada)*, 1(17), 77–83.
<https://doi.org/10.21501/21454086.1907>
- Díaz José, Ó., Porras Umaña, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013). *Colección Trópico Húmedo. El cacao (Theobroma cacao L.): avances y retos en la gestión de la innovación*. (Universidad Autónoma Chapingo, Ed.; 1a ed., Vol. 4).
- Domínguez, M. N., Alemán, R. E. Z., Chávez, R. C., & Reynoso, F. L. (s/f). Evaluación de la concentración de metales pesados (Cd, Pb y V) en sedimentos acuáticos de la reserva de la biosfera pantanos de Centla, Tabasco. En *20 años de tecnología e innovación sustentable* (pp. 113–129). Red Iberoamericana de academias de investigación A.C.
- Dostert, N., Roque, J., Asunción, C., La Torre, M. I., & Maximiliano, W. (2011). *Factsheet: Datos botánicos de cacao*.
- Durán Sosa, I., Granda Valdés, M., & Pomares Alfonso, M. S. (2014). Influencia de la composición del suelo en la determinación de cromo por espectrometría de absorción atómica con llama aire/acetileno. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 45, 9–17.
- Fanego Hernández, S. I., & Carabeo Pérez, V. (2017). Empleo de técnicas de alta precisión en la industria azucarera para el análisis de mieles finales. *ICIDCA. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cubar*, 51(3), 50–57.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223158039008>
- Fang, A., Dong, J., & An, Y. (2019). Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals under different land-use types in Xuzhou City, China. *Sustainability*, 11(7), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/su11071832>
- Flores, C. M., Del Angel, E., Frías, D. M., & Gómez, A. L. (2018). Evaluation of physicochemical parameters and heavy metals in water and surface sediment in the ilusiones Lagoon, Tabasco, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 39–57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-02>
- Florida Rofner, N., Juan, H., García, P., Salinas Jacobo, S. S., Escobar Mamani, F., & Torres García, J. (2019). Effect of compost and NPK on the levels of microorganisms and cadmium in soil and almond of cocoa. *Revista de Investigación Altoandinas*, 21(4), 4–264.
<https://doi.org/10.18271/ria.2019.503>
- Francisco Santiago, S. P., Palma López, D. J., Sánchez Hernández, R., Obrador Olán, J. J., & García Alamilla, P. (2023). Fertilidad edáfica y nutrición en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*) en tres suelos de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1116>
- Franco C., A., & Scaldaferrero R., K. (2017). *Determinación de plaguicidas y metales pesados en sedimentos superficiales del embalse el Guájaro como consecuencia de la actividad agrícola en el Distrito de*

- riego Repelón, Atlántico. [Tesis de grado]. Corporación Universidad de la Costa, CUC. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental.
- García, A. (2008). La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo. *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, 18.
- García, C., Moreno, J. L., Hernández, Ma. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125–138.
- García Gutiérrez, C., & Rodríguez Meza, G. D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa (3, Trad.). *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable (Ra Ximhai)*, 8(3), 1–10.
- Gasca Estrada, S. (2015). *Caracterización química de biomateriales empleando espectroscopia de masas y de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS e ICP-OES)* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Ingeniería Química Metalúrgica.
- Ginés, I., & Mariscal Sancho, I. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo*. E.T.S.I. Agrónomos (UPM) [antigua denominación]. www.agrogen.com.mx/mainaplicaciones.htm
- Gómez Puentes, F. J. (2014). *Caracterización y movilidad de contaminantes en un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos* [Tesis de grado de Doctorado]. Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ingeniería.
- González Chávez, M. C. A., Carrillo González, R., & Sánchez López, A. S. (2017). Definitions and difficulties in scientific research regarding aspects of soil phytoremediation. *Agroproductividad. Aspectos de fitoremediación de suelos*, 10(4), 3–7.
- Greger, M. (2004). Metal Availability, Uptake, Transport and Accumulation in Plants. En *Heavy Metal Stress in Plants* (2da edición, pp. 1–27). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07743-6_1
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M., & Ellerta, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4), 367–385.
- 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. (2020). Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. *Egyptian Journal of Petroleum*, 29(1), 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.10.002>
- Hardy, F. (1961). *Manual de cacao* (F. Hardy, Ed.; 10a ed.). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).
- He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V. C., Zhang, T., & Stoffella, P. J. (2015). Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*, 9, 17–18. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators>

- Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2017). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. *Journal of Environmental Management*, 207, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.072>
- Huisha Quigla, A. M., & Pichucho Llumiquinga, D. J. (2022). *Trazabilidad microbiológica presente en sitios poco monitoreados y contaminados con arsénico proveniente de fuentes naturales entre los 3200 y 3400 msnm, en la parroquia de Toacaso, provincia de cotopaxi, año 2022* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Facultad de ciencias agropecuarias y recursos naturales.
- INEGI. (s/f). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Cunduacán Tabasco*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia
- INEGI. (2013). *Uso de suelo y vegetación*. Cartografía y Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000; versión 3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2015). *Anuario estadístico y geográfico de Tabasco*.
- INIFAP, & CONABIO. (2008, marzo). *Edafología*. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). Catálogo de metadatos geográficos.
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Medellín.
- Jaramillo Jaramillo, F. D. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), 215–232. [https://doi.org/https://doi.org/10.18257/raccefyn.30\(115\).2006.2242](https://doi.org/https://doi.org/10.18257/raccefyn.30(115).2006.2242)
- Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., & Cao, H. (2016). Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168, 1658–1668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.088>
- Jiménez Heinert, M. E., Grijalva Endara, A. de las M., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento (RECIMUNDO)*, 4(4), 4–12. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)
- Jordán López, A. (2005). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. <http://biblioteca.utsem-morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf>
- King, P. M. (1981). Comparison of Methods for Measuring Severity of Water Repellence of Sandy Soils and Assessment of some Factors that Affect its Measurement. *Revista australiana de investigación del suelo*, 19(3), 275–285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR9810275>

- Lache García, A., Meléndez Correa, L. V., Orrego, J. A., Mejía Ospino, E., Pachón, Z., & Cabanzo, R. (2011). Predicción Del Análisis Sara De Crudos Colombianos Por Métodos Quimiométricos Utilizando Espectroscopia Infrarroja-ATR. *Revista Colombiana de Física*, 43(3).
- Le Bissonnais, Y. (2016). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11–21. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311
- López López, M. (2007). *Metales Pesados y Biorremediación*.
- Lora Silva, R. (2007). Contaminación por elementos menores y posibles soluciones. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 10, 5–20.
- Lozano, Z. , B. C., Ovalles, F. , H. R. M., Moreno, B. , P. L., & Villanueva, J. G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1), 61–72.
- Lwin, C. S., Seo, B. H., Kim, H. U., Owens, G., & Kim, K. R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—a critical review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), 156–167. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938>
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., & Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(4), 171–182.
- 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>
- Martínez Chávez, C. G., Morales Bautista, C. M., De, M., & Alor Chávez, J. (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8, 9–16. http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/9
- Martínez, V. E., & López S., M. y F. (2001). Efectos de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso. *Tierra Latinoamericana*, 19(1), 9–17. www.imp.mx
- Matthew Méndez, A., Carrillo Penieres, J. G., & Ortega Jiménez, F. (2023). Extracción líquido-líquido. En UNAM. Facultad de estudios superiores Cuautitlan. Departamento de Ciencias Químicas. UNAM.
- Medina Méndez, J., Volke Haller, V. H., González Ríos, J., Galvis Spínola, A., & Santiago Cruz, M. J. (2006). Changes in time in the physical properties of the soil in rain-fed maize and irrigated mango systems in Luvisols in the state of Campeche. *Universidad y Ciencia. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*, 22(2), 175–189. www.ujat.mx/publicaciones/uciencia
- Meléndez, L. V., Lache, A., Orrego-Ruiz, J. A., Pachón, 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*, 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.04.016>

- Mendoza Escalona, B., Torres Rodríguez, D., Merú Marcó, L., Gómez, C., Estanga Barrios, M., & García Orellana, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *Tecnológicas*, 24(51), e1738. <https://doi.org/10.22430/22565337.1738>
- Montaser, A. (1998). *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (A. Montaser, Ed.). John Wiley Sons.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1097-x>
- Morales Bautista, C. M., Méndez Olán, C., López Martínez, S., & Ojeda Morales, M. E. (2020). *Design of experiments to optimize soxhlet-TPH method to establish environmental diagnostics of polluted soil: optimization of the soxhlet TPH method by DOE* (E. Carrillo-Cedillo, J. Rodríguez-Ávila, K. Arredondo-Soto, & J. M. Cornejo-Bravo, Eds.). Diseño de experimentos para aplicaciones químicas, farmacéuticas, alimentarias e industriales. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1518-1.ch002>
- Morales Guerra, D. J. (2015). *Validación de una técnica de cuantificación de nutrientes Calcio, Magnesio, Potasio, Fósforo, Azufre y Boro en foliolo de Palma Africana (Elaeis guineensis), a través de espectrofotometría de emisión óptica de plasma (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala)*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería.
- Morales Ramos, P. C., Estrada-Andrade, L. F., Alor-Chávez, M. de J., Méndez-Olán, C., & Morales-Bautista, C. M. (2022). Condiciones de fertilidad de un suelo en Comalcalco, Tabasco, México. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 85–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5347>
- Morillas, P. P., Terra, A. I., Uribe, C., Mastro Monaco, G., Prieto, J. L., & Torres, M. (2016). *Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos- Una Guía de Laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados* (Primera Edición, Vol. 66). Eurolab España.
- Munsell Color (Firm). (2010). *Munsell soil color charts : with genuine Munsell color chips*. Grand Rapids, MI :Munsell Color.
- Naranjo, C. G. P., Maurice, L., De Lourdes Ochoa-Herrera, V., López, F., Egas, D. A., Lagane, C., & Besson, P. (2015). Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7.
- National Institute of Standards y Technology. (2018). *Standard Reference Material ® 2710a. Montana I Soil*.
- Navarro Blaya, S., & Navarro García, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (Segunda). Ediciones Mundi Prens.
- Navarro Mendoza, S., Aragón Sulik, M., & Belmonte Jiménez, S. (2002). Parámetros físicos y químicos que influyen sobre la aptitud de un sitio destinado a la disposición de residuos municipales.

- Memorias. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca*, 1–7. <https://www.researchgate.net/publication/265399449>
- Norma Oficial de Ecuador. (2015). *Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados*.
- Núñez, C. E. (2008). *Extracciones con equipo Soxhlet*. www.cenunez.com.ar
- Onder, S., Dursun, S., Gezgin, S., & Demirbas, A. (2007). Determination of Heavy Metal Pollution in Grass and Soil of City Centre Green Areas (Konya, Turkey). *Revista Polaca de estudios ambientales*, 16(1), 145–154.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano, Golfo de México Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19–42.
- Palma López, D. J., Cisneros Dominguez, J., Moreno Caliz, E., & Rincon Ramirez, J. (2007). *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable* (primera edición). Colegio de Postgraduados. <https://www.researchgate.net/publication/293958380>
- Palma López, J. D., Jiménez Ramírez, R., Zavala Cruz, J., Bautista Zuñiga, F., Gavi Reyes, F., & Palma Cancino, D. Y. (2017). Updating the classification of soils in Tabasco, México. *Agro productividad*, 10(12), 29–35.
- Peña, E. A., Alfonso, M. S. P., Tagle, M. E. V., Marín, M. T. L., & Pereira-Filho, E. R. (2019). Desarrollo de nuevos procedimientos analíticos para la evaluación racional y sustentable de minerales lateríticos de la zona norte oriental de Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 9(3), 663.
- Peñuelas R., J. L., & B.L. Ocaña. (1996). *Cultivo de plantas forestales en contenedor: principios y fundamentos*. Mundi Prensa.
- Perkin Elmer. (2017). *Customer Hardware and Service Guide*.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P., & Favetto, A. (2009). Tomografías eléctricas en el basurero municipal Ciudad de Gualagaychú, provincia de Entre Ríos: evidencias de contaminación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(4), 603–614.
- Prat Perez, L. (1981). *Importancia de la reacción del suelo* (Instituto de Orientación y Asistencia Técnica del Oeste, Ed.). Centro de Edafología y Biología aplicada EXCMA.
- Ramírez Carvajal, R. (1997). *Propiedades físicas y químicas y biológicas de los suelos* (C. Naranjo O., Ed.; pp. 5–23).
- Ramos Reyes, R., Zavala Cruz, J., Gama Campillo, L., Pech Pool, D., & Ortiz Pérez, M. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581–597.
- Restrepo, J., Gómez, J., & Escobar, R. (2014). *Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura*. Fundación para la Investigación y el Desarrollo Agrícola (FIDAR).

https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/56825/Residuos_Organicos_Agricultura_FIDAR.pdf?sequence=1

- Reynosa Correa, C. M., & Díaz Mena, F. M. (2016). *Estado de los suelos y capacidad de uso de la tierra en la finca El Cacao, La Fonseca – Kukra Hill*. [Tesis de Ingeniería]. Universidad Nacional Agraria. Facultad de recursos naturales y del ambiente.
- Rinaldi, D. S. (2015). *Estudio de los contenidos de elementos inorgánicos de interés ambiental en suelos afectados por derrames de combustibles derivados del petróleo* [Tesis de Maestría]. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Rivas Domínguez, M. R., & Escuintla Morán, J. J. (2021). *Procedimientos en Qgis: extracción de curvas de nivel, mapa de pendientes, modelo 3d, índice de vegetación mejorado y clasificación semiautomática* (p. 66). Universidad Doctor Andrés Bello. <http://www.unab.edu.sv/publicaciones//page/2>.
- Rucks. L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*.
- Salamanca Jiménez, A., & Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana*.
- Salazar Ledesma, F. L. (2008). De señor a tributario: historia breve del gran Mazapa. *Península*, 3(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/cephcis.25942743e.2008.3.1.44349>
- Sánchez Barrón, G., & Casermeiro Martínez, M. Á. (2016). *Ecotoxicología del Cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*.
- Sánchez Palacios, M. A. (s/f). *Método de Calibrado*.
- Santos Francés, F., Martínez Graña, A., Rojo, P. A., & García Sánchez, A. (2017). Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the andes mountain range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph14080859>
- Satoh, T., & Inayat Hussain, S. H. (2002). *Environmental toxicology and human health* (T. Satoh, Ed.; Vol. 1).
- SEMARNAT. (1993). *Norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente*. Diario Oficial de la Federación.
- 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.
- SEMARNAT. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003&print=true

- SEMARNAT. (2003). *Norma oficial mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos*. Diario Oficial de la Federación.
- 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.
- SEMARNAT. (2005). *Norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2006). *Norma Mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006. Suelos-hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría-método de prueba soils-heavy fraction hydrocarbons by extraction and gravimetry-test method*. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2012). *Norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2016). *Norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*. Diario Oficial de la Federación.
- Seravalli, J. (2012). *Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo como herramienta para el análisis de alto rendimiento de plantas*.
- Servant, R. E., Zaretsky, A., & Farías, S. S. (2010). Validación de un procedimiento para la determinación de boro, manganeso, molibdeno y vanadio mediante ICP-OES en aguas de zonas mineras a restituir. En *En Simposio de Metrología*.
- Siebe, C., Cram, S., Herre, A., & Fernández-Buces, N. (2005). Distribución de metales pesados en los suelos de la llanura aluvial baja del Activo Cinco Presidentes, Tabasco. *Golfo de México*, 431.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Duran, A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. En *Facultad de Agronomía* (Vol. 10, p. 20). Boletín de Investigación.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental* (S. Cervantes González, Ed.; 6ta ed.). McGraw-Hill.
- Solís Pérez, Y. Y., Gómez-Mellado, A. Y., Morales-Bautista, C. M., Méndez-Olán, C., Lobato-García, C. E., & Peña-Morán, O. A. (2019). Factibilidad ecológica de dos técnicas de remediación según las propiedades de un suelo aluvial contaminado con aguas congénitas. *Journal of Basic Sciences*, 5(15).
- Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., S. F. de Araujo, A., & Singh, R. P. (2017). Agroecological responses of heavy metal pollution with special emphasis on soil health and plant performances. En *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 5, Número 64). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00064>

- Steffan, J. J., Brevik, E. C., Burgess, L. C., & Cerdà, A. (2017). The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 159–171. <https://doi.org/10.1111/ejss.12451>
- Suarez, R., Arévalo, E., Linares, L., Ustáriz, F., & Hernández, G. (2009). Validación de un método analítico para la determinación de magnesio eritrocitario. *Avances en Química*, 4(2), 53–62.
- Torregrosa, D., Gómez-Pertusa, C., Serrano, R., Grindlay, G., Gras, L., & Mora, J. (2021). *Beneficios de las interferencias espectrales y no espectrales en técnicas espectroscópicas de plasma*.
- Triano Sánchez, A., Palma López, D. J., Salgado García, S., Lagunes Espinoza, L. C., & Córdova Avalos, V. (2016). Nutrición orgánica en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 9(12), 39–44.
- Trucíos Caciano, R., Rivera González, M., Delgado Ramírez, G., Estrada Ávalos, J., & Cerano Paredes, J. (2013). Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 339–346.
- United States Pharmacopeial Convention Inc. (2015). *United States Pharmacopeia 38 NF-33*.
- UNODC, O. de las N. U. contra la D. y el D. (2010). *Directrices para la validación de métodos analíticos y la calibración del equipo utilizado para el análisis de drogas ilícitas en materiales incautados y especímenes biológicos*.
- Van Reeuwijk, L. P. (1999). Procedimientos para análisis de suelos (clasificación y correlación). Trad. al español por MC Gutiérrez Castorena, CA Tavares E. y CA Ortiz Solorio. En L. P. Van Reeuwijk (Ed.), *Posgrado en Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Posgraduados* (1ra en Español). Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. <https://www.researchgate.net/publication/316451504>
- Van Vliet, J. A., & Giller, K. E. (2017). Mineral Nutrition of Cocoa: A Review. En *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 185–270). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017>
- Vargas, J. R. (2018). *Extracción con fluidos supercríticos: aplicaciones de interés farmacéutico*.
- Vargas Rojas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos de la FAO* (Cuarta). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.
- Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). The incorporation of organic amendments in the form of compost and vermicompost reduces the negative effects of monoculture in soils. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 105–112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12>
- Vázquez Vázquez, L. L., Ojeda Morales, M. E., Macías Valadez Treviño, M. E., Sánchez Lombardo, I., Macías Valadez, M. Z., Méndez Olán, C., & Morales Bautista, C. M. (2021). Fracciones de hidrocarburos en la evaluación del impacto ambiental de suelos contaminados. *Avances de Investigación en Ingeniería Aplicada*, 664.
- Velandia Cabra, J. R. (2018). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5, 115–140. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>

World Health Organization. (2010). *International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides Guidelines for the Registration of Pesticides* (Dr. M. Zaim/WHOPEs, Ed.). World Health Organization.

Yzquierdo Ruiz, M. M., Torres Sánchez, S. A., De la Garza Rodríguez, I. M., Ojeda Morales, M. E., Hernández Nuñez, E., Lobato García, C. E., Hernández Rivera, M. A., Zurita Macias, M., & Morales-Bautista, C. M. (2022). Pre-evaluation of contaminated soil for oil field reactivation in Moloacan, Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 21(2).
<https://doi.org/10.24275/rmiq/1A2753>

Zavala Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma López, D., Bautista Zúñiga, F., & Reyes, F. G. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 161–171. www.ujat.mx/era161

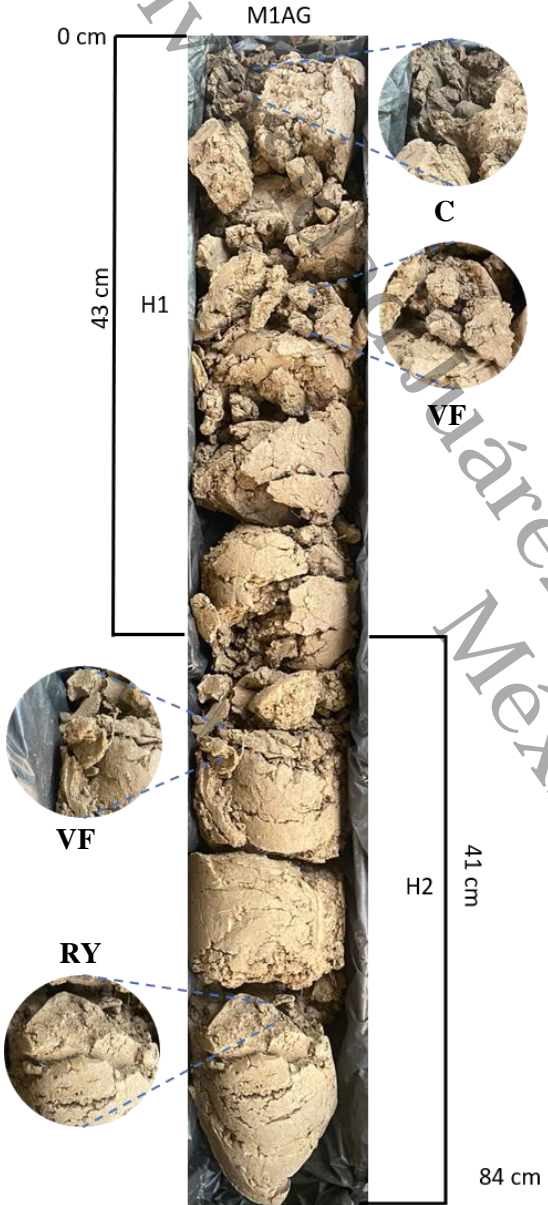
Referencias Pictográficas

Figura 1. Rucks, L (2004). Clasificación de las partículas del suelo [Figura]. Recuperado de <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>

VIII. ANEXOS

Apartado 1

DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M1AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	25/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.136122596086164	Longitud: -93.20670007916662		X: 0478135	Y: 2005258
Profundidad	H1 0-43 cm	H2 43-84 cm	TOTAL: 84 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	43 cm		41 cm	
Humedad al tacto	Mediana		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Limo/Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta moteas marrones	+	Presenta moteas marrones rojizos
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow 10 YR 5/8 Yellowish Brown	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow
Grietas	-	Presenta pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Muy baja
H ₂ O ₂	+	Baja	+	Baja
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M1AG</p> <p>0 cm</p> <p>43 cm</p> <p>H1</p> <p>C</p> <p>VF</p> <p>VF</p> <p>RY</p> <p>H2</p> <p>41 cm</p> <p>84 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-43 cm</p>	<p>Con una extensión de 43 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presentando una textura limo/arcillosa al tacto en húmedo característico, con presencia de motas color marrón-amarillento en seco 10 YR 5/8 (yellowish brown) y amarillas rojizas 7.5 YR (reddish yellow). Cuenta con raíces muy finas (VF) y muy pocas (V). La presencia de materia orgánica visible son raíces, pequeños fragmentos de hoja secas y corteza (C). Se observó reactividad media con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es media ya que el suelo esta levemente saturado. Además, no hay presencia de biota y la transición a la siguiente capa es tenue, presenta pocas grietas, sin presencia de olor ni de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>43-84 cm</p>	<p>Con una extensión de 41 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco 10 YR 6/3 (pale brown). Cuenta con textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas. Se observaron motas color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Cuenta con raíces escasas y muy pocas (V) y muy finas (VF). La presencia de materia orgánica es baja, con reactividad baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH); la permeabilidad y humedad son altas ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas, sin presencia de olor ni de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

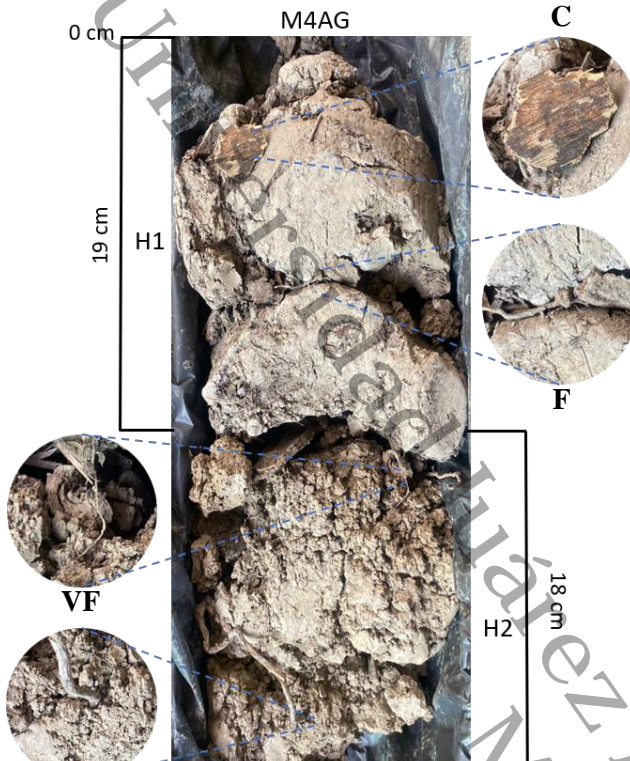
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M2AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.135960127106074	Longitud: -93.20649191297066		X: 0478157	Y: 2005240
Profundidad	H1 0-24 cm	H2 24-60 cm	TOTAL: 60 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	24 cm		26 cm	
Humedad al tacto	Media		Media	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla/limo		Arcilla/limo	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	presenta	-	No presenta
Moteas	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow
Grietas	-	Presenta pocas	-	Presenta muy pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Negativo	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
<p>M2AG</p> <p>0 cm</p> <p>24 cm</p> <p>H1</p> <p>VF</p> <p>C</p> <p>RY</p> <p>VF</p> <p>H2</p> <p>26 cm</p> <p>60 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-24 cm</p>	<p>Con 24 cm de extensión, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura limo/arcillosa al tacto en húmedo característico, la presencia de motas es de color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Las raíces son muy finas (VF) y algunas gruesas (C), la abundancia es muy poca (V) en ambos casos. La presencia de materia orgánica visible son raíces de diversos grosores y formas. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y negativo con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y la humedad es media ya que el suelo esta levemente saturado. Hay presencia de biota y la transición a la siguiente capa es gradual, presenta pocas grietas y sin presencia de olor ni de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>24-60 cm</p>	<p>Con 26 cm de extensión, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es limo/arcillosa al tacto en húmedo característico, la presencia de motas en color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Las raíces son escasas, muy pocas (V) y muy finas (VF). La presencia de materia orgánica es baja, la reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH); la permeabilidad y humedad es media ya que el suelo esta levemente saturado. Sin presencia de biota y presencia de muy pocas grietas. Sin presencia de olor ni de material antropogénico y la materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M3AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.135960127106074	Longitud: -93.20649191297066		X: 0478157	Y: 2005240
Profundidad	H1 0-30 cm	H2 30-71 cm	TOTAL: 71 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	30 cm		41 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish Brown		Pale Brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: C	+	Diámetro: F Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	2.5 YR 2.5/1 reddish black	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta pocas
Olor	-	No presenta	-	No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarasca	-	Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy Baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
<p>M3AG</p> <p>0 cm</p> <p>30 cm</p> <p>H1</p> <p>H</p> <p>VF</p> <p>G</p> <p>F</p> <p>H2</p> <p>41 cm</p> <p>71 cm</p>	<p>H1 0-30 cm</p>	<p>Con una extensión de 30 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown). Presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas, hay presencia de motas en color rojizo oscuro en seco 2.5 YR 2.5/1 (reddish black). Las raíces son muy finas (VF) con abundancia común (C). La presencia de materia orgánica es visible como raíces y pequeños fragmentos de hoja secas (H). La reactividad es alta con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), mediana con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no se encuentra saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es drástica, presenta muy pocas grietas y sin presencia de olor ni de material antropogénico.</p>
	<p>H2 30-71 cm</p>	<p>Con una extensión de 41 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con presencia de motas color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Las raíces son escasas y muy pocas (V) y finas (F). La presencia de materia orgánica es baja, la reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH); y la permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas (G). Sin presencia de olor y material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

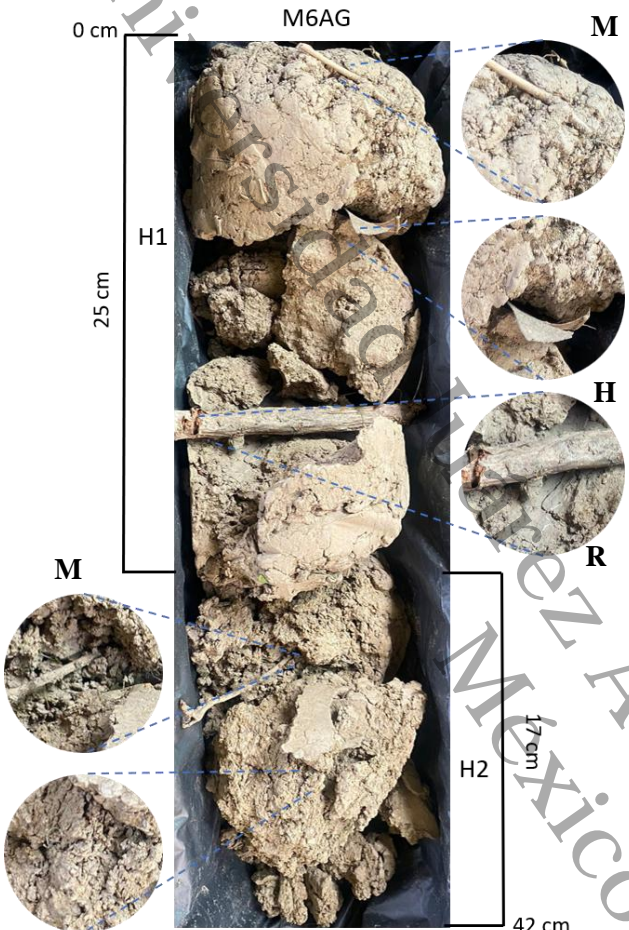
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M4AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.13548113974142	Longitud: -93.20644408396947		X: 0478162	Y: 2005187
Profundidad	H1 0-19 cm	H2 19-37 cm	TOTAL: 37 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	19 cm		18 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: F Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	10 YR 6/6 brownish yellow	+	10 YR 6/6 brownish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, Costras de arbol		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M4AG</p> <p>0 cm</p> <p>19 cm</p> <p>H1</p> <p>18 cm</p> <p>H2</p> <p>37 cm</p> <p>C</p> <p>F</p> <p>VF</p> <p>M</p>	<p>H1 0-19 cm</p>	<p>Con una extensión de 19 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas, cuenta con motas en color amarillo amarronado en seco 10 YR 6/6 (brownish yellow). Las raíces son finas (F) con abundancia muy poca (V). La presencia de materia orgánica es visible compuesta por raíces y fragmentos de corteza de árbol (C). La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es drástico y presenta muy pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2 19-37 cm</p>	<p>Con una extensión de 18 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas, con motas color amarillo amarronado en seco 10 YR 6/6 (brownish yellow). Las raíces son escasas pero diversas, muy pocas (V) y muy finas (VF), y algunas (V) medianas (M). La presencia de materia orgánica es baja, la reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH); la permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

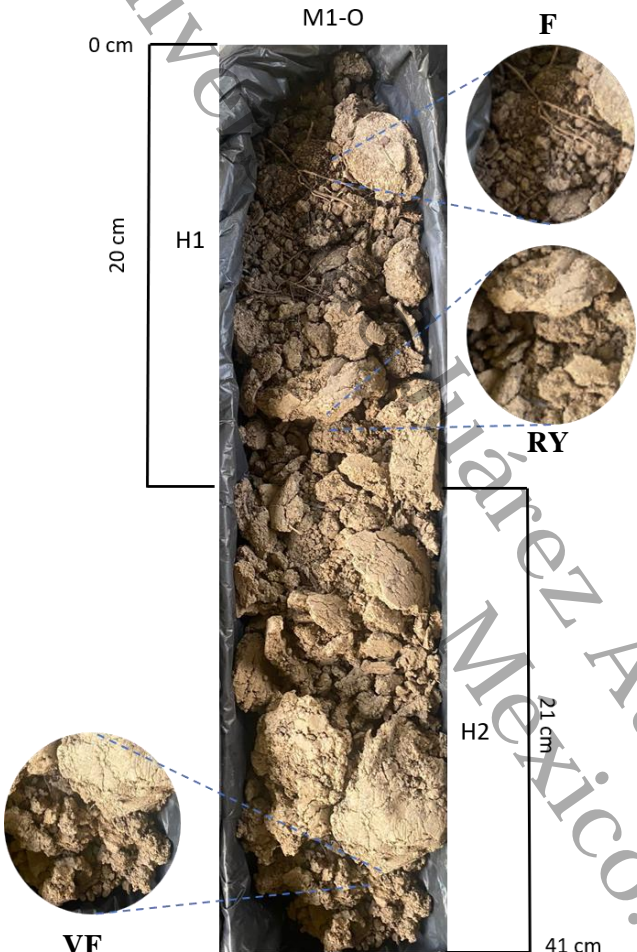
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFÍL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M5AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.135472344439638	Longitud: -93.20621719205192		X: 0478186	Y: 2005186
Profundidad	H1 0-22 cm	H2 22-56 cm	TOTAL: 56 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	22 cm		34 cm	
Humedad al tacto	Media/alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla/limo		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: C	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	2.5 YR 2.5/1 reddish black	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
<p>M5AG</p> <p>0 cm</p> <p>22 cm</p> <p>H1</p> <p>H</p> <p>VF</p> <p>VF</p> <p>RY</p> <p>H2</p> <p>34 cm</p> <p>56 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-22 cm</p>	<p>Con una extensión de 22 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura limo/arcillosa al tacto en húmedo característico con motas color rojizo oscuro en seco 2.5 YR 2.5/1 (reddish black). Las raíces son muy finas (VF) con abundancia común (C). La presencia de materia orgánica es visible compuesta por raíces y pequeños fragmentos de hoja secas. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es media/alta ya que el suelo esta levemente saturado y sin presencia de biota. La transición a la siguiente capa es gradual, presenta muy pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>22-56 cm</p>	<p>Con una extensión de 34 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Las raíces son escasas (V) y muy finas (VF). La presencia de materia orgánica es baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH); La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin olor y material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

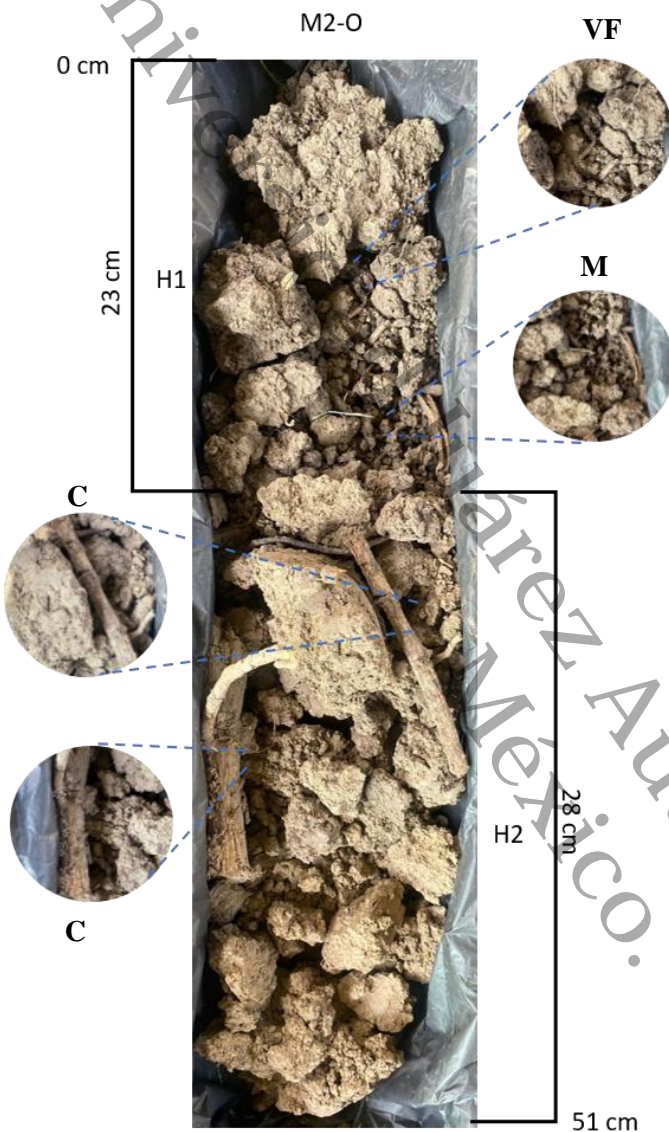
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M6AG "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.13526439922716	Longitud: -93.20627366873127		X: 0478180	Y: 2005163
Profundidad	H1 0-25 cm	H2 25-42 cm	TOTAL: 42 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	25 cm		17 cm	
Humedad al tacto	Alta/Media		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: M Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow	+	10 YR 6/6 brownish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarasca, rama de árbol		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy Baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M6AG</p> <p>0 cm</p> <p>H1</p> <p>25 cm</p> <p>M</p> <p>H</p> <p>R</p> <p>M</p> <p>VF</p> <p>H2</p> <p>17 cm</p> <p>42 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-25 cm</p>	<p>Con una extensión de 25 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas, con motas color amarillo rojizo en seco (7.5 YR 6/8). Se encontraron raíces medias (M) con muy poca (V) abundancia, así como también pocas (F) raíces muy finas (VF). La presencia de materia orgánica visible son raíces, un trozo de rama de árbol (R) y fragmentos de hojarasca (H). La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es media/alta ya que el suelo está levemente saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es drástico, presenta muy pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>25-42 cm</p>	<p>Con una extensión de 17 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo con motas en color amarillo amarronado en seco (10 YR 6/6). Las raíces son muy pocas(V), medianas (M) y muy finas (VF). La materia orgánica es baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

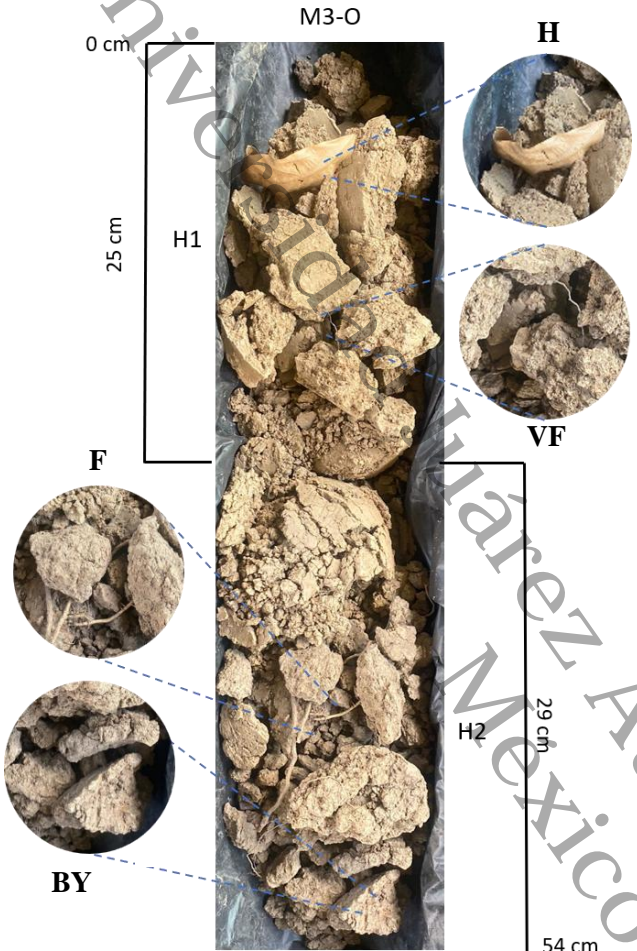
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M1-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.13291892037057	Longitud: -93.21856015779895		X: 0476880	Y: 2004905
Profundidad	H1 0-20 cm	H2 20-41 cm	TOTAL: 41 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	20 cm		21 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: F Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow	+	10 YR 6/6 brownish yellow
Grietas	-	Presenta pocas	-	Presenta pocas
Olor	-	No presenta	-	No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, Costras de árbol	-	Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
	<p>H1 0-20 cm</p>	<p>Con 20 cm de extensión, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas, con motas color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Tiene raíces finas (F) con muy poca (V) abundancia. La materia orgánica visible son raíces y pequeños fragmentos de costras de ramas secas. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biotay la transición a la siguiente capa es gradual, presenta pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2 20-41 cm</p>	<p>Con 21 cm de extensión, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color amarillo amarronado en seco 10 YR 6/6 (Brownish Yellow). Las raíces son muy pocas (V) y muy finas (VF). La materia orgánica es muy baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M2-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	25/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.13305485096346	Longitud: -93.21824836886351		X: 0476913	Y: 2004920
Profundidad	H1 0-23 cm	H2 23-51 cm	TOTAL: 51 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	23 cm		28 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 4/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Dark grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta moteas blancas	+	Presenta moteas marrones
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: F	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	5R 8/1 White	+	10 YR 5/8 Yellowish brown
Grietas	-	Presenta pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Negativo	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+	Baja	+	Baja
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M2-O</p> <p>0 cm</p> <p>23 cm</p> <p>H1</p> <p>VF</p> <p>M</p> <p>C</p> <p>C</p> <p>H2</p> <p>28 cm</p> <p>51 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-23 cm</p>	<p>Con una extensión de 23 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color en seco 10 YR 6/4 (light yellowish Brown). Las raíces son muy finas (VF) y pocas (F), y muy pocas (V) raíces medianas (M). La materia orgánica se integra por pasto, raíces y pequeños fragmentos de hoja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y negativo con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es gradual, presenta pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>23-51 cm</p>	<p>Con una extensión de 28 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5 YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (Pale Brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color marrón oscuras en seco 10 YR 5/8 (Yellowish Brown). Las raíces son muy pocas (V) y muy finas (VF), también hay raíces gruesas (C) pero muy pocas (V). La materia orgánica baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son raíces.</p>

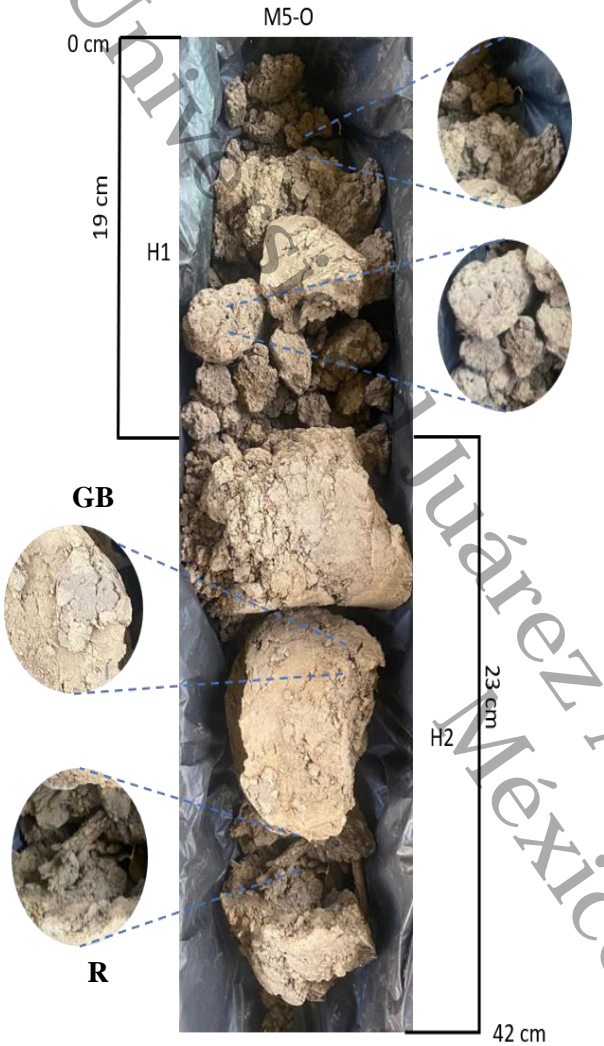
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M3-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	30/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.133045565942748	Longitud: -93.21846578241613		X: 0476890	Y: 2004919
Profundidad	H1 0-25 cm	H2 25-54 cm	TOTAL: 54 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	25 cm		29 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 6/3		10 YR 5/2	
Color Munsell	Pale brown		Grayish brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta	+	Presenta
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: V	+	Diámetro: F Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow	+	10 YR 6/6 brownish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta muy pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas		Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy Baja	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+		+	
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M3-O</p> <p>0 cm</p> <p>25 cm</p> <p>H1</p> <p>H</p> <p>VF</p> <p>F</p> <p>BY</p> <p>H2</p> <p>29 cm</p> <p>54 cm</p>	<p>H1 0-25 cm</p>	<p>Con una extensión de 25 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color amarillo rojizo en seco 7.5 YR 6/8 (reddish yellow). Las raíces son muy finas (VF) y muy pocas (V). La materia orgánica visible son raíces y hojas secas (H). La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no se encuentra saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es gradual, presenta muy pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2 25-54 cm</p>	<p>Con una extensión de 29 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), la textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color amarillo amarronado en seco (10 YR 6/6 Brownish Yellow). Las raíces son muy pocas (V) y finas (F). La materia orgánica es muy baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son solo raíces.</p>

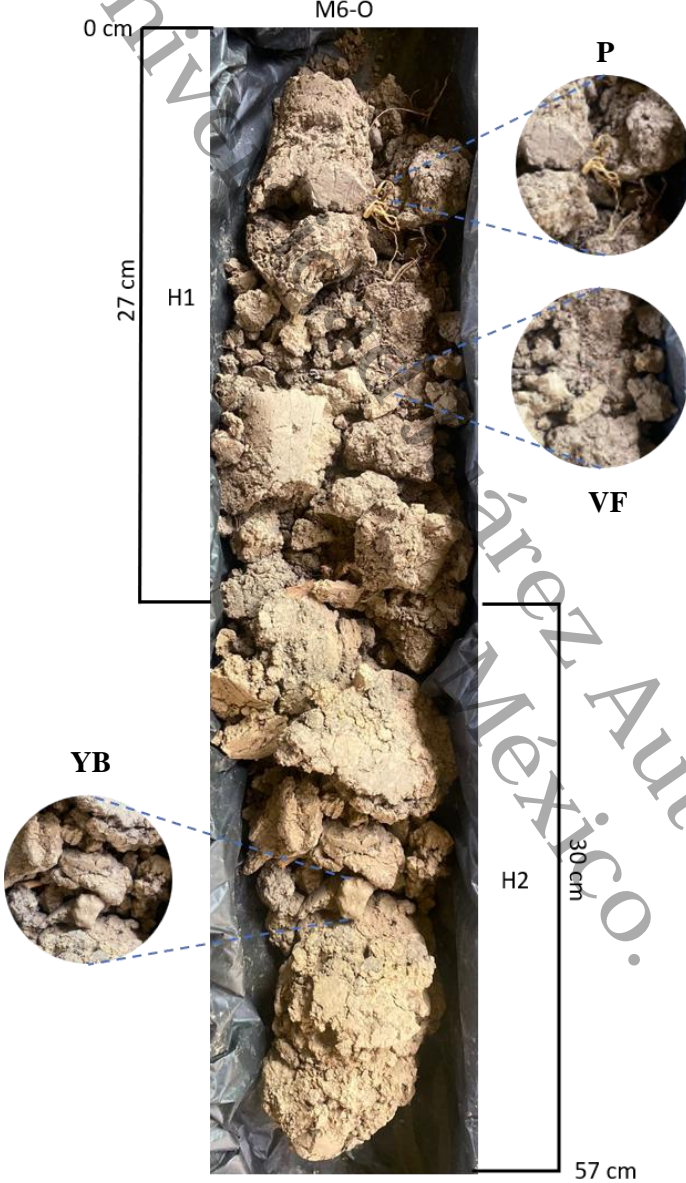
DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M4-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	2/02/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.133343877666494	Longitud: -93.21842833955041		X: 0476894	Y: 2004952
Profundidad	H1 0-19 cm	H2 19-50 cm	TOTAL: 50 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	19 cm		31 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	grayish brown		Pale brown	
Textura	Limo/Arcilla		Limo/Arcilla	
Agregados	+	Presenta moteas marrones	+	Presenta moteas marrones
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: V Diámetro: F Abundancia: V	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	5 YR 8/1 White	+	7.5 YR 6/8 reddish yellow
Grietas	-	Presenta muy pocas y chicas	-	Presenta muy pocas
Olor	-	No presenta	-	No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas	-	Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Muy baja
H ₂ O ₂	+	Baja	+	Baja
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
<p>M4-O</p> <p>0 cm</p> <p>19 cm</p> <p>H1</p> <p>F</p> <p>VF</p> <p>VF</p> <p>RY</p> <p>H2</p> <p>31 cm</p> <p>50 cm</p>	<p>H1 0-19 cm</p>	<p>Con una extensión de 19 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), tiene una textura limo/arcillosa al tacto en húmedo característico con motas color marrón claro en seco (10 YR 6/4, light yellowish brown). Agregados en color 5R 8/1. Las raíces que se encuentran son muy finas (VF) y finas (F) en abundancia muy pocas (V). La materia orgánica visible son raíces y pequeños fragmentos de hoja secas. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es drástico, presenta pocas grietas y pequeñas en tamaño, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2 19-50 cm</p>	<p>Con una extensión de 31 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es limo/arcillosa al tacto en húmedo característico con motas color amarillo rojizo en seco (7.5 YR 6/8). Las raíces son muy pocas (V) y muy finas (VF). La materia orgánica es baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son raíces.</p>

DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M5-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	25/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.133380385108005	Longitud: -93.21811642655753		X: 0476927	Y: 2004956
Profundidad	H1 0-19 cm	H2 19-42 cm	TOTAL: 42 cm	
Drenaje		Material parental		Subunidad
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	19 cm		23 cm	
Humedad al tacto	Alta		Alta	
Matriz de suelo	10 YR 5/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta moteas marrones	+	Presenta moteas marrones oscuros
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: F	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	10 YR 6/4 light yellowish brown	+	10 YR 5/2 grayish brown
Grietas	-	Presenta muy pocas	-	Presenta pocas
Olor		No presenta		No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarascas, pasto		Presenta Raíces, hojarascas, rama de árbol
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Negativo	+	Muy Baja
H ₂ O ₂	+	Baja	+	Muy Baja
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M5-0</p> <p>0 cm</p> <p>19 cm</p> <p>H1</p> <p>GB</p> <p>R</p> <p>23 cm</p> <p>H2</p> <p>42 cm</p>	<p>P</p> <p>H1</p> <p>0-19 cm</p> <p>VF</p>	<p>Con una extensión de 19 cm, el color base del suelo en seco es 10 YR 5/2 (grayish brown), la textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color marrón claro en seco (10 YR 6/4, light yellowish Brown). Las raíces son muy finas (VF) y pocas (F). La materia orgánica se constituye de pasto (P), raíces y pequeños fragmentos de hojas. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y negativo con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es gradual, con pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>19-42 cm</p>	<p>Con una extensión de 23 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (Pale Brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color marrón oscuras en seco (10 YR 5/2). Las raíces son muy pocas (V) y muy finas (VF). La materia orgánica es baja. La reactividad es muy baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y pocas grietas, sin presencia de olor y de material antropogénico. La materia orgánica que se logra percibir son raíces y hojarasca y pedazos de rama (R) de árbol.</p>

DESCRIPCIÓN EDÁFICA DEL PERFIL				
Área de estudio	LABORATORIO DE SUELOS E HIDROCARBUROS, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB)			
MUESTRA:	MUESTRA M6-O "INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA"			
Fecha	25/01/23	Clima: Despejado	Encargado (s): Betel del Carmen Ramos González	
Coordenadas				
Coordenadas Geográficas			Coordenadas UTM (15 Q)	
Latitud: 18.13375045767908	Longitud: -93.21856119032692		X: 0476880	Y: 2004997
Profundidad	H1 0-27 cm	H2 27-57 cm	TOTAL: 57 cm	
Drenaje	Material parental		Subunidad	
DESCRIPCION POR HORIZONTE				
Horizonte	H1		H2	
Longitud	27 cm		30 cm	
Humedad al tacto	Alta		Media/alta	
Matriz de suelo	10 YR 4/2		10 YR 6/3	
Color Munsell	Dark grayish brown		Pale brown	
Textura	Arcilla		Arcilla	
Agregados	+	Presenta moteas marrones	+	Presenta moteas marrones
Raíces	+	Diámetro: VF Abundancia: F	+	Diámetro: VF Abundancia: V
Biota	-	No presenta	-	No presenta
Moteas	+	10 YR 6/4 light Yellowish brown	+	10 YR 5/4 Yellowish brown
Grietas	-	Presenta medianas	-	Presenta pocas y chicas
Olor	-	No presenta	-	No presenta
Material antropogénico	-	No presenta	-	No presenta
Materia orgánica	-	Presenta Raíces, hojarasca	-	Presenta Raíces
REACTIVIDAD				
CH ₃ COOH	+	Muy baja	+	Negativo
H ₂ O ₂	+	Baja	+	Baja
HCl	-		-	
OBSERVACIONES:				

	Ho. Prof.	Descripción
 <p>M6-O</p> <p>0 cm</p> <p>27 cm</p> <p>H1</p> <p>P</p> <p>VF</p> <p>YB</p> <p>H2</p> <p>30 cm</p> <p>57 cm</p>	<p>H1</p> <p>0-27 cm</p>	<p>Con una extensión de 27 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo (10YR 5/4), y en seco es 10 YR 4/2 (dark grayish brown), presenta una textura arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas color marrón claro en seco 10 YR 6/4 (light yellowish brown). Las raíces son muy finas (VF) y muy pocas (V). La materia orgánica es pasto (P), raíces y pequeños fragmentos de hoja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y muy baja con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad y humedad es alta ya que el suelo no está saturado. Sin presencia de biota y la transición a la siguiente capa es gradual, presenta grietas medianas, sin presencia de olor y de material antropogénico.</p>
	<p>H2</p> <p>27-57 cm</p>	<p>Con una extensión de 30 cm, el color base del suelo en húmedo es pardo claro (7.5YR 6/4) y en seco es 10 YR 6/3 (pale brown). La textura es arcillosa al tacto en húmedo característico de las arcillas con motas en color marrón amarillento en seco 10 YR 5/4 (yellowish brown). Las raíces son muy pocas (V) y muy finas (VF). La materia orgánica es baja. La reactividad es baja con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y negativa con ácido acético (CH₃COOH). La permeabilidad es alta ya que el suelo no está saturado y la humedad es media/alta. Sin presencia de biota, con pocas y chicas grietas. Sin presencia de olor y de material antropogénico. La única materia orgánica que se logra percibir son raíces.</p>

Apartado 2

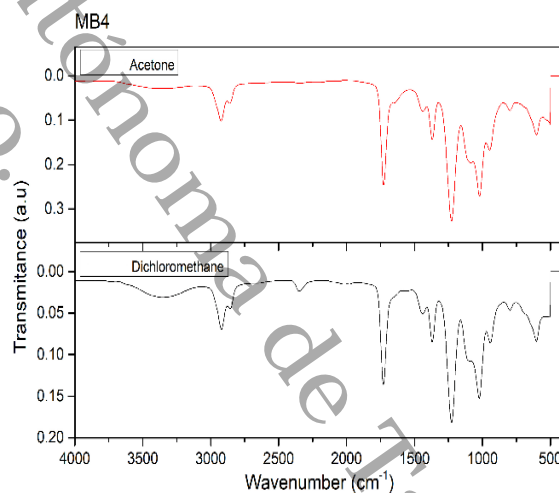
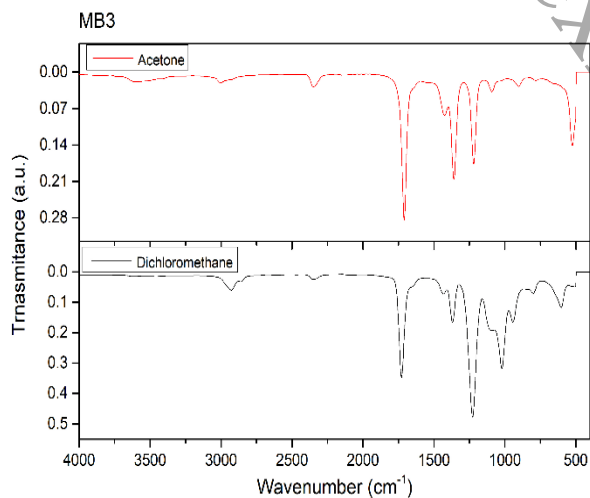
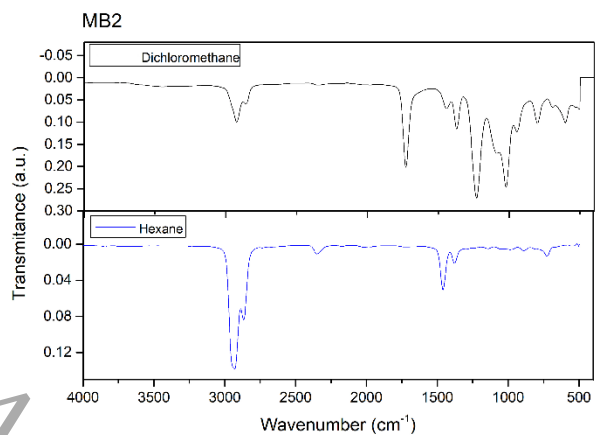
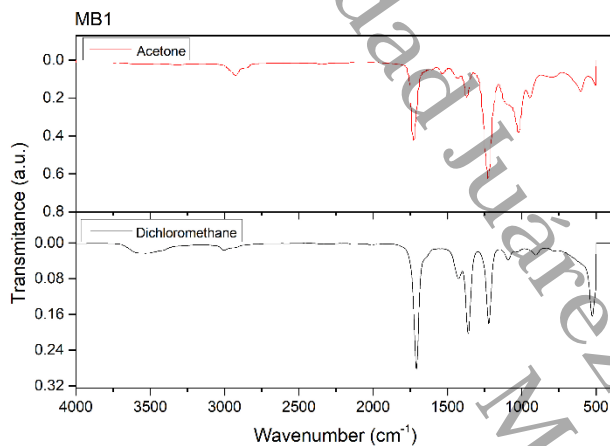
Micronutrientes

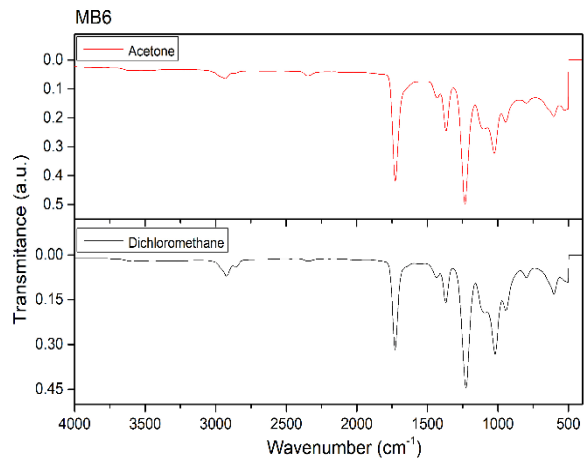
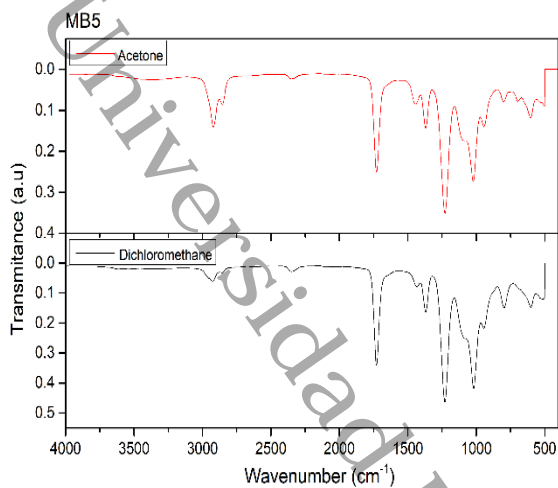
Tabla 1. Concentración de micronutrientes en las muestras de suelo de los polígonos P1, P2 y P3.

ID	Fe (mg/kg)	Cu(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Mn(mg/kg)
M1AGH1	32436.2893±4606.6845	42.8576±0.6673	81.2971±2.0113	654.5672±7.1774
M1AGH2	38709.0278±489.8098	27.0394±9.2481	61.3555±25.3637	847.4050±37.9238
M2AGH1	32804.4001 ±51.1577	52.2758±0.9933	79.6574±1.6766	728.4267±2.0216
M2AGH2	35124.9615 ±163.5410	33.8907±0.5782	71.5473±1.0659	620.9712±1.5885
M3AGH1	34725.0495±251.9688	48.0714±0.5620	83.3309±0.7801	410.1265±2.5519
M3AGH2	34601.6673±344.1321	31.5023±0.6625	69.1548±0.3414	463.5681±1.2378
M4AGH1	36372.3419 ±120.1718	35.3818±1.2263	77.1610±2.3856	551.3841±8.2337
M4AGH2	32763.7327±8097.0733	31.4275±0.5707	65.6645±1.1310	737.4965±4.7781
M5AGH1	32537.7452±50.8317	57.4982±1.2438	79.8062±2.4769	430.3398±6.9263
M5AGH2	39058.8582 ±423.9525	39.3597±0.1371	72.7324±0.8308	510.8068±6.4865
M6AGH1	35589.6895 ±147.4401	30.7084±1.3403	76.2128±3.1103	522.9483±3.1535
M6AGH2	38793.9516±291.3531	30.3208±0.4098	71.7536±0.9213	674.0413±1.5320
M1OH1	28634.8566±240.7460	35.6752±0.3357	50.8201±0.5333	362.3380±4.4793
M1OH2	31521.1855±326.7732	21.1350±0.0831	43.8545±0.2814	371.4386±2.8870
M2OH1	27240.8266 ±240.0470	43.6197±0.6102	50.6985±1.0535	362.0380±1.8679
M2OH2	30406.4680 ±107.2091	22.9540±0.4961	42.5872±0.6400	397.2638±29.406
M3OH1	31952.4853 ±159.7925	32.2545±0.9040	45.7141±1.2395	381.4790±1.9453
M3OH2	31412.4087±258.7856	19.8578±0.2185	40.5825±0.8962	433.3050±4.3806
M4OH1	27041.7519±224.5444	23.6149±0.6472	38.6798±1.1453	302.9514±3.3268
M4OH2	30561.5328 ±86.9354	17.3240±0.5429	38.3899±0.6251	476.6163±4.2992
M5OH1	26115.2491 ±127.4794	30.4061±1.3413	47.5898±2.2827	275.4673±0.7422
M5OH2	30817.5617±172.6565	20.3044±0.8054	40.6912±0.6417	392.0113±4.0485
M6OH1	26085.5860 ±152.0257	38.8051±0.6346	46.3281±0.6144	323.8147±2.8022
M6OH2	25143.4991±9141.7930	19.3207±1.1384	36.3936±2.2304	424.3220±191.191
MB1H1	19727.7068±164.9842	8.1907±0.2162	20.1613±0.7152	259.6028±2.9990
MB1H2	11158.8605 ±40.8438	7.2350±0.2663	24.5826±0.5610	165.7703±0.4934
MB2H1	18843.9366 ±37.8911	12.5976±0.5119	57.4499±0.6635	260.2850±0.8400
MB2H2	21933.4553 ±219.3610	14.9006±0.3959	47.3596±0.7701	306.5464±0.8394
MB3H1	22428.5813 ±226.4459	13.7540±0.3689	44.6789±0.3968	297.4583±0.9885
MB4H1	24889.1896 ±85.0279	13.8266±0.3417	32.8059±0.4881	353.3862±3.6367

MB4H2	17338.7902 ±65.4499	22.0221±0.9075	52.5362±1.1858	223.3240±1.5678
MB5H1	23163.6109 ±414.8269	16.8410±0.3166	32.3221±0.4173	355.2888±3.3648
MB5H2	19915.0106±90.8938	10.9241±0.1706	20.2361±0.2956	287.0925±1.8867
MB6H1	29095.1598±131.8466	16.4867±0.2307	34.1716±0.4323	431.5257±1.6812
MB6H2	16858.3816±171.1580	9.2524±0.2114	19.2371±0.2424	231.6518±1.9855

Apartado





Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	“ESTUDIO DE FERTILIDAD Y ELEMENTOS QUÍMICOS EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA CON DIFERENTES TRATAMIENTOS EN DOS ZONAS EN TABASCO”.
Autora de la Tesis:	BETEL DEL CARMEN RAMOS GONZÁLEZ
ORCID:	0009-0007-3152-1035
Resumen de la Tesis:	<p>La agricultura es la fuente de economía principal en el estado de Tabasco, en la actualidad se ha presentado baja productividad de cultivo debido a diversas limitantes. El objetivo fue realizar un estudio de fertilidad, contaminación de hidrocarburos y elementos químicos en suelos de uso agrícola. Las muestras se tomaron considerando: un primer polígono tratado con productos inorgánicos (P1), un segundo con orgánicos (P2), y un tercer polígono (P3) en un tiradero de residuos sólidos urbanos (TRSU), por tratarse de una posible fuente de contaminación. La metodología utilizada para la determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los HTP solo se determinaron en el P3 y las fracciones SARA se obtuvieron mediante el método de Martínez-Chávez et al. (2017), y para la cuantificación de los elementos químicos se utilizó la técnica de Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Los resultados de los parámetros físicos y químicos presentaron diferencias significativas entre los tres polígonos. Los hidrocarburos en el P3 se encontraron por arriba de los límites máximos establecidos. De los elementos estudiados de acuerdo con NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se encontró que superaron los límites de la siguiente manera: en el P1 Cd > Ni > V, en los P2 y P3 solo se encontró Cd. El mapa de pendientes mostró la hídrica superficial del terreno y se obtuvo que la dispersión de los metales pesados es ocasionada por el arrastre de partículas generado por los escurrimientos provenientes de las zonas de mayor altitud afectando al P2. El mayor aporte de estos contaminantes al P1 es ocasionado por los fertilizantes fosfatados utilizados para el cultivo.</p>
Palabras claves	edafología, fertilidad, agroquímicos, metales pesados, suelos

de la Tesis:	
Referencias citadas:	<p>Abad Peña, E. (2018). <i>Análisis multielemental de minerales lateríticos pro ICP-OES. Efectos matriz, su reducción y posibles mecanismos</i>. [Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Químicas]. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales. Universidad de La Habana. Facultad de Química. Departamento de Química Analítica.</p> <p>Adams, R. H., ZaVala-Cruz, J., & Morales-García, F. (2008). <i>Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación</i>. 33(ISSN 0378-1844), 483–489.</p> <p>Adimalla, N. (2019). Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review. <i>Environmental Geochemistry and Health</i>, 42(1), 173–190. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00324-4</p> <p>Adimalla, N. (2020). Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. <i>Environmental Geochemistry and Health</i>, 42(1), 59–75. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00270-1</p> <p>Aguilar Orea, G. F. (2013). <i>Variación de la repelencia al agua de los suelos en función de la profundidad, del contenido de humedad, de la posición topográfica y de la cobertura vegetal, en la cuenca del río Los Gavilanes, Veracruz</i> [Tesis para obtener grado de Licenciatura en Geografía]. Universidad Veracruzana. Facultad de Economía.</p> <p>Aguirre, M. A. (2015). Avances en la preparación de muestras líquidas para un análisis elemental con técnicas espectrométricas basadas en plasma: ICP-OES, ICP-MS Y LIBS [Tesis para la obtención de título de Doctor en Química]. En <i>Tesis</i>. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Química Analítica. Nutrición y Bromatología.</p>

Akbar, K. F., H.G. Hale, W., D. Headley, A., & Athar, M. (2006). Heavy Metal Contamination of Roadside Soils of Northern England. *Soil & Water Research*, 1(4), 158–163. <https://doi.org/10.17221/6517-SWR>

Almagro Fernández, B., Canals Hernández, A., & Gañán-Calvo, A. M. (2007). *Procedimiento y dispositivo para la producción de aerosoles líquidos y su uso en espectrometría analítica (atómica y de masas)*.

Alvarado Gámez, A. L. (2016). *Determinación electroquímica de vanadio y tungsteno en aguas con electrodos serigrafados modificados con nanomateriales y enzimas*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Burgos. Departamento de Química. Área de Química Analítica.

Amézquita, E. (1999). *Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza* (1a ed., Vol. 20, pp. 73–86). Palmas.

Arévalo Gardini, E., Obando Cerpa, M. E., Zúñiga Cernades, L. B., Arévalo Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81–89. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>

Arguijo Portillo, N. V., Guerrero Peña, A., Domínguez Rodríguez, V. I., Carrillo

Ávila, E., & Zavala Cruz, J. (2019). Calibration models for the spectrophotometric quantification of total oil hydrocarbons in soil. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 469–479.

<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.17>

Azañero Aquino, L. (2016). *Calidad del suelo en tres sistemas de uso en la localidad de río espino – monzón*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva .

Balcazar Rueda, I. R., Gómez Rodríguez, A. C., García Ocaña, J. A., & López Ocaña, G. (2020). Effects of pollutants in soil by an open-heavy dump in Tabasco.

The Journal of Engineering and Exact Sciences, 4(1), 1–18.

<https://doi.org/10.19136/Jeeos.a4n1.3473>

Baver, L. D., Gardner, W. H., & Gardner, W. R. (1973). *Física de suelo*. UTEHA.

Beltrán Pineda, M. E. (2014). Comparative study of total microbial populations and solubilizers of phosphate in soils of paramo cultivated with potato (*solanum tuberosum*) in Ventaquemada - Boyacá. *Investigación, Innovación, Ingeniería*, 1(2), 56–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.24267/23462329.65>

Brady, N. C., & Weil, R. W. (1999). *The nature and properties of soils* (12a ed.). Prentice Hall Publishers.

Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción ecológica*, 24(1), 35–42.

Bravo Inclán, L., Saldaña Fabela, P., Izurieta Dávila, J., & Mijangos Carro, M. (2009). *La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo*.

Bravo Realpe, I. del S., Arboleda Pardo, C. A., & Martín Peinado, F. J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Ciencias del suelo. Acta agronómica*, 63(2), 164–174.

Buenaiver Ortiz, M. T., & Rodríguez Araujo, E. A. (2016). Determinación de la estabilidad de agregados del suelo en diferentes agroecosistemas del departamento norte de Santander. *Sociedad Colombiana del suelo. Suelos Ecuatoriales*, 46(1 y 2), 42–50.

Cajuste, L. J., Alarcón, A. V., Grabach, C. D. S., González, G. A., & De la Isla, M. D. L. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 35(3), 267–274.

Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (1998). Hormesis as a Biological Hypothesis. *Environ Health Perspectives*, 106(1), 357–362.

<http://ehpnet11.niehs.nih.gov/docs/1998/Suppl-1/357-362calabrese/abstract.html>

Cano, J. (2021). Heavy metals and soil fertility at N Channel irrigation, Puno, Peru. *Manglar*, 18(4), 419–426. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.054>

Carbajal Pita, L. H. Z., & Nolasco Estrella, B. A. (2011). *Análisis de Silicio orgánico por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) en muestras de aceite crudo*. [Tesis de grado]. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.

Casas Flores, R. (2012). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas* (1a ed.). Ediciones Paraninfo, S.A.

Castebianco, J. A. (2018). Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation. *Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 21–35.

<https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>

Cepeda Dovala, J. M. (1991). *Química de suelos* (Primera edición). Editorial Trillas.

Chipana Paulino, D. D. (2016). *Desarrollo y validación de un método analítico para valoración de metronidazol, clotrimazol y lidocaína clorhidrato en óvulos vaginales, por cromatografía de líquidos (HPLC)* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Farmacia y Bioquímica.

Cina, M. (2017). *Evaluación de métodos de mineralización de muestras y análisis multielemental de granos de maíz mediante espectrometría de emisión atómica con plasma generado por microondas (MPAES)*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de La Pampa. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Ciudad, M. (2011). *Determinaciones de macro y microconstituyentes en el suero y su disponibilidad nutricional por ICP OES*.

CNH. (2023). *Atlas geológico. Cuencas del sureste-cinturón plegado de la sierra de Chiapas*.

Compañía Nacional de Chocolates. (1988). *Manual para el cultivo de cacao* (1988 La compañía, Ed.; Tercera edición). EDINALCO.

CONAGUA. (2020). *Subdirección general técnica gerencia de aguas subterráneas. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Samaria-Cunduacán (2703), Estado de Tabasco*.

Coras Merino, P. M. (1987). *Características y propiedades físicas del suelo en relación con el riego* (D. G. de D. C. D. de P. D. de I. 2003 Universidad Autónoma Chapingo, Ed.; Primera edición). Editorial Gaceta.

Cordero, C. Y. (2018). Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí [Tesis para obtener grado de Maestro en Geociencias Aplicadas]. En *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT)*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

Cornejo Oviedo, F. M., López Herrera, M., Beltrán Hernández, R. I., Acevedo Sandoval, O. A., Lucho Constantino, C. A., & Reyes Santamaría, M. I. (2012). Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 873–880.

Cremona, V. M., & Enriquez, A. S. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
<https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>

Cruz Garritz, D., Chamizo, J. A., & Garritz, A. (1986). Estructura atómica. Un enfoque químico. En D. C. J. A. ; G. Andoni. E. A. de México. CRUZ (Ed.), *Capítulo 3. Espectros atómicos, modelo de Bohr y vieja teoría cuántica*. Universidad Autónoma de México. USA, Adison Wesley Iberoamericana, SA.

Dávila Sámano, A. R., Castillo Suárez, L. A., Linares Hernández, I., García Colindres, M. A., & Martínez Miranda, V. (2024). Efectos ambientales en el aire, agua y suelo de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario del Estado de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 3(91). <https://doi.org/https://doi.org/10.33064/iycuaa2024914520e4520>

Dekker, L. W., & C.J. Ritsema. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507–2517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/94WR00749>

Delgado Londoño, D. M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos (revista descontinuada)*, 1(17), 77–83. <https://doi.org/10.21501/21454086.1907>

Díaz José, Ó., Porras Umaña, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013). *Colección Trópico Húmedo. El cacao (Theobroma cacao L.) : avances y retos en la gestión de la innovación*. (Universidad Autónoma Chapingo, Ed.; 1a ed., Vol. 4).

Domínguez, M. N., Alemán, R. E. Z., Chávez, R. C., & Reynoso, F. L. (s/f). Evaluación de la concentración de metales pesados (Cd, Pb y V) en sedimentos acuáticos de la reserva de la biosfera pantanos de Centla, Tabasco. En *20 años de tecnología e innovación sustentable* (pp. 113–129). Red Iberoamericana de academias de investigación A.C.

Dostert, N., Roque, J., Asunción, C., La Torre, M. I., & Maximiliano, W. (2011). *Factsheet: Datos botánicos de cacao*.

Durán Sosa, I., Granda Valdés, M., & Pomares Alfonso, M. S. (2014). Influencia de la composición del suelo en la determinación de cromo por espectrometría de absorción atómica con llama aire/acetileno. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 45, 9–17.

Fanego Hernández, S. I., & Carabeo Pérez, V. (2017). Empleo de técnicas de alta precisión en la industria azucarera para el análisis de mieles finales. *ICIDCA. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cubar*, 51(3), 50–57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223158039008>

Fang, A., Dong, J., & An, Y. (2019). Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals under different land-use types in Xuzhou City, China. *Sustainability*, 11(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su11071832>

Flores, C. M., Del Angel, E., Frías, D. M., & Gómez, A. L. (2018). Evaluation of physicochemical parameters and heavy metals in water and surface sediment in the ilusiones Lagoon, Tabasco, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 39–57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-02>

Florida Rofner, N., Juan, H., García, P., Salinas Jacobo, S. S., Escobar Mamani, F., & Torres García, J. (2019). Effect of compost and NPK on the levels of microorganisms and cadmium in soil and almond of cocoa. *Revista de Investigación Altoandinas*, 21(4), 4–264. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.503>

Francisco Santiago, S. P., Palma López, D. J., Sánchez Hernández, R., Obrador Olán, J. J., & García Alamilla, P. (2023). Fertilidad edáfica y nutrición en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres suelos de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1116>

Franco C., A., & Scaldaferro R., K. (2017). *Determinación de plaguicidas y metales pesados en sedimentos superficiales del embalse el Guájaro como consecuencia de la actividad agrícola en el Distrito de riego Repelón, Atlántico*. [Tesis de grado]. Corporación Universidad de la Costa, CUC. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental.

García, A. (2008). La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo. *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, 18.

García, C., Moreno, J. L., Hernández, Ma. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125–138.

García Gutiérrez, C., & Rodríguez Meza, G. D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa (3, Trad.). *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable (Ra Ximhai)*, 8(3), 1–10.

Gasca Estrada, S. (2015). *Caracterización química de biomateriales empleando espectroscopía de masas y de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS e ICP-OES)* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Ingeniería Química Metalúrgica.

Ginés, I., & Mariscal Sancho, I. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo*. E.T.S.I. Agrónomos (UPM) [antigua denominación].
www.agrogen.com.mx/mainaplicaciones.htm

Gómez Puentes, F. J. (2014). *Caracterización y movilidad de contaminantes en un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos* [Tesis de grado de Doctorado]. Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ingeniería.

González Chávez, M. C. A., Carrillo González, R., & Sánchez López, A. S. (2017). Definitions and difficulties in scientific research regarding aspects of soil phytoremediation. *Agroproductividad. Aspectos de fitoremediación de suelos*, 10(4), 3–7.

Greger, M. (2004). Metal Availability, Uptake, Transport and Accumulation in Plants. En *Heavy Metal Stress in Plants* (2da edición, pp. 1–27). Springer-Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-07743-6_1

Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M., & Ellerta, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4), 367–385.

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. (2020). Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. *Egyptian Journal of Petroleum*, 29(1), 39–44.

<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.10.002>

Hardy, F. (1961). *Manual de cacao* (F. Hardy, Ed.; 10a ed.). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).

He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V. C., Zhang, T., & Stoffella, P. J. (2015). Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*, 9, 17–18. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators>

Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2017). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. *Journal of Environmental Management*, 207, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.072>

Huisha Quigla, A. M., & Pichucho Llumiquinga, D. J. (2022). *Trazabilidad microbiológica presente en sitios poco monitoreados y contaminados con arsénico proveniente de fuentes naturales entre los 3200 y 3400 msnm, en la parroquia de Toacaso, provincia de cotopaxi, año 2022* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Facultad de ciencias agropecuarias y recursos naturales.

INEGI. (s/f). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Cunduacán Tabasco*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia

INEGI. (2013). *Uso de suelo y vegetación*. Cartografía y Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000; versión 3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2015). *Anuario estadístico y geográfico de Tabasco*.

INIFAP, & CONABIO. (2008, marzo). *Edafología*. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). Catálogo de metadatos geográficos.

Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Medellín.

Jaramillo Jaramillo, F. D. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), 215–232.

[https://doi.org/https://doi.org/10.18257/raccefyn.30\(115\).2006.2242](https://doi.org/https://doi.org/10.18257/raccefyn.30(115).2006.2242)

Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., & Cao, H. (2016). Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168, 1658–1668.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.088>

Jiménez Heinert, M. E., Grijalva Endara, A. de las M., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento (RECIMUNDO)*, 4(4), 4–12.

[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)

Jordán López, A. (2005). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

<http://biblioteca.utsem->

[morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf](http://biblioteca.utsem-morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf)

King, P. M. (1981). Comparison of Methods for Measuring Severity of Water Repellence of Sandy Soils and Assessment of some Factors that Affect its Measurement. *Revista australiana de investigación del suelo*, 19(3), 275–285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR9810275>

Lache García, A., Meléndez Correa, L. V., Orrego, J. A., Mejía Ospino, E., Pachón, Z., & Cabanzo, R. (2011). Predicción Del Análisis Sara De Crudos Colombianos Por Métodos Quimiométricos Utilizando Espectroscopia Infrarroja-ATR. *Revista Colombiana de Física*, 43(3).

Le Bissonnais, Y. (2016). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11–21. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311

López López, M. (2007). *Metales Pesados y Biorremediación*.

Lora Silva, R. (2007). Contaminación por elementos menores y posibles soluciones. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 10, 5–20.

Lozano, Z. , B. C., Ovalles, F. , H. R. M., Moreno, B. , P. L., & Villanueva, J. G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1), 61–72.

Lwin, C. S., Seo, B. H., Kim, H. U., Owens, G., & Kim, K. R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—a critical review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), 156–167. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938>

Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., & Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(4), 171–182.

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>

Martínez Chávez, C. G., Morales Bautista, C. M., De, M., & Alor Chávez, J. (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8, 9–16. http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/9

Martínez, V. E., & López S., M. y F. (2001). Efectos de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso. *Tierra Latinoamericana*, 19(1), 9–17. www.imp.mx

Matthew Méndez, A., Carrillo Penieres, J. G., & Ortega Jiménez, F. (2023). Extracción líquido-líquido. En *UNAM*. Facultad de estudios superiores Cuautitlan. Departamento de Ciencias Químicas. UNAM.

Medina Méndez, J., Volke Haller, V. H., González Ríos, J., Galvis Spínola, A., & Santiago Cruz, M. J. (2006). Changes in time in the physical properties of the soil in rain-fed maize and irrigated mango systems in Luvisols in the state of Campeche. *Universidad y Ciencia. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*, 22(2), 175–189. www.ujat.mx/publicaciones/uciencia

Meléndez, L. V., Lache, A., Orrego-Ruiz, J. A., Pachón, 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*, 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.04.016>

Mendoza Escalona, B., Torres Rodríguez, D., Merú Marcó, L., Gómez, C., Estanga Barrios, M., & García Orellana, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, 24(51), e1738. <https://doi.org/10.22430/22565337.1738>

Montaser, A. (1998). *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (A. Montaser, Ed.). John Wiley Sons.

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.

<https://doi.org/10.1007/s13762-016-1097-x>

Morales Bautista, C. M., Méndez Olán, C., López Martínez, S., & Ojeda Morales, M. E. (2020). *Design of experiments to optimize soxhlet-TPH method to establish environmental diagnostics of polluted soil: optimization of the soxhlet TPH method by DOE* (E. Carrillo-Cedillo, J. Rodríguez-Ávila, K. Arredondo-Soto, & J. M. Cornejo-Bravo, Eds.). Diseño de experimentos para aplicaciones químicas, farmacéuticas, alimentarias e industriales. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1518-1.ch002>

Morales Guerra, D. J. (2015). *Validación de una técnica de cuantificación de nutrientes Calcio, Magnesio, Potasio, Fósforo, Azufre y Boro en foliolo de Palma Africana (Elaeis guineensis), a través de espectrofotometría de emisión óptica de plasma (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala)*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería.

Morales Ramos, P. C., Estrada-Andrade, L. F., Alor-Chávez, M. de J., Méndez-Olán, C., & Morales-Bautista, C. M. (2022). Condiciones de fertilidad de un suelo en Comalcalco, Tabasco, México. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 85–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5347>

Morillas, P. P., Terra, A. I., Uribe, C., Mastromonaco, G., Prieto, J. L., & Torres, M. (2016). *Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos- Una Guía de Laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados* (Primera Edición, Vol. 66). Eurolab España.

Munsell Color (Firm). (2010). *Munsell soil color charts : with genuine Munsell color chips*. Grand Rapids, MI :Munsell Color.

Naranjo, C. G. P., Maurice, L., De Lourdes Ochoa-Herrera, V., López, F., Egas, D. A., Lagane, C., & Besson, P. (2015). Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7.

National Institute of Standards y Technology. (2018). *Standard Reference Material* ® 2710a. *Montana I Soil*.

Navarro Blaya, S., & Navarro García, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (Segunda). Ediciones Mundi Pesa.

Navarro Mendoza, S., Aragón Sulik, M., & Belmonte Jiménez, S. (2002). Parámetros físicos y químicos que influyen sobre la aptitud de un sitio destinado a la disposición de residuos municipales. *Memorias. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca*, 1–7.
<https://www.researchgate.net/publication/265399449>

Norma Oficial de Ecuador. (2015). *Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados*.

Núñez, C. E. (2008). *Extracciones con equipo Soxhlet*. www.cenunez.com.ar

Onder, S., Dursun, S., Gezgin, S., & Demirbas, A. (2007). Determination of Heavy Metal Pollution in Grass and Soil of City Centre Green Areas (Konya, Turkey). *Revista Polaca de estudios ambientales*, 16(1), 145–154.

Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano, Golfo de México Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19–42.

- Palma López, D. J., Cisneros Dominguez, J., Moreno Caliz, E., & Rincon Ramirez, J. (2007). *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable* (primera edición). Colegio de Postgraduados. <https://www.researchgate.net/publication/293958380>
- Palma López, J. D., Jiménez Ramírez, R., Zavala Cruz, J., Bautista Zuñiga, F., Gavi Reyes, F., & Palma Cancino, D. Y. (2017). Updating the classification of soils in Tabasco, México. *Agro productividad*, 10(12), 29–35.
- Peña, E. A., Alfonso, M. S. P., Tagle, M. E. V., Marín, M. T. L., & Pereira-Filho, E. R. (2019). Desarrollo de nuevos procedimientos analíticos para la evaluación racional y sustentable de minerales lateríticos de la zona norte oriental de Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 9(3), 663.
- Peñuelas R., J. L., & B.L. Ocaña. (1996). *Cultivo de plantas forestales en contenedor: principios y fundamentos*. Mundi Prensa.
- Perkin Elmer. (2017). *Customer Hardware and Service Guide*.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P., & Favetto, A. (2009). Tomografías eléctricas en el basurero municipal Ciudad de Gualagaychú, provincia de Entre Ríos: evidencias de contaminación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(4), 603–614.
- Prat Perez, L. (1981). *Importancia de la reacción del suelo* (Instituto de Orientación y Asistencia Técnica del Oeste, Ed.). Centro de Edafología y Biología aplicada EXCMA.
- Ramírez Carvajal, R. (1997). *Propiedades físicas y químicas y biológicas de los suelos* (C. Naranjo O., Ed.; pp. 5–23).
- Ramos Reyes, R., Zavala Cruz, J., Gama Campillo, L., Pech Pool, D., & Ortiz Pérez, M. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581–597.

Restrepo, J., Gómez, J., & Escobar, R. (2014). *Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura*. Fundación para la Investigación y el Desarrollo Agrícola (FIDAR).
https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/56825/Residuos_Organicos_Agricultura_FIDAR.pdf?sequence=1

Reynosa Correa, C. M., & Díaz Mena, F. M. (2016). *Estado de los suelos y capacidad de uso de la tierra en la finca El Cacao, La Fonseca – Kukra Hill*. [Tesis de Ingeniería]. Universidad Nacional Agraria. Facultad de recursos naturales y del ambiente.

Rinaldi, D. S. (2015). *Estudio de los contenidos de elementos inorgánicos de interés ambiental en suelos afectados por derrames de combustibles derivados del petróleo* [Tesis de Maestría]. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Rivas Domínguez, M. R., & Escuintla Morán, J. J. (2021). *Procedimientos en Qgis: extracción de curvas de nivel, mapa de pendientes, modelo 3d, índice de vegetación mejorado y clasificación semiautomática* (p. 66). Universidad Doctor Andrés Bello. <http://www.unab.edu.sv/publicaciones//page/2>.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*.

Salamanca Jiménez, A., & Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana*.

Salazar Ledesma, F. L. (2008). De señor a tributario: historia breve del gran Mazapa. *Península*, 3(1).

<https://doi.org/https://doi.org/10.22201/cephcis.25942743e.2008.3.1.44349>

Sánchez Barrón, G., & Casermeiro Martínez, M. Á. (2016). *Ecotoxicología del Cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*.

Sánchez Palacios, M. A. (s/f). *Método de Calibrado*.

Santos Francés, F., Martínez Graña, A., Rojo, P. A., & García Sánchez, A. (2017). Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the andes mountain range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph14080859>

Satoh, T., & Inayat Hussain, S. H. (2002). *Environmental toxicology and human health* (T. Satoh, Ed.; Vol. 1).

SEMARNAT. (1993). *Norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente*. Diario Oficial de la Federación.

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.

SEMARNAT. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Diario Oficial de la Federación.
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003&print=true

SEMARNAT. (2003). *Norma oficial mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos*. Diario Oficial de la Federación.

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.

SEMARNAT. (2005). *Norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.* Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. (2006). *Norma Mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006. Suelos-hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría-método de prueba soils-heavy fraction hydrocarbons by extraction and gravimetry-test method.* Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. (2012). *Norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.* Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. (2016). *Norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.* Diario Oficial de la Federación.

Seravalli, J. (2012). *Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo como herramienta para el análisis de alto rendimiento de plantas.*

Servant, R. E., Zaretsky, A., & Farías, S. S. (2010). Validación de un procedimiento para la determinación de boro, manganeso, molibdeno y vanadio mediante ICP-OES en aguas de zonas mineras a restituir. En *En Simposio de Metrología.*

Siebe, C., Cram, S., Herre, A., & Fernández-Buces, N. (2005). Distribución de metales pesados en los suelos de la llanura aluvial baja del Activo Cinco Presidentes, Tabasco. *Golfo de México*, 431.

Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Duran, A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. En *Facultad de Agronomía* (Vol. 10, p. 20). Boletín de Investigación.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental* (S. Cervantes González, Ed.; 6ta ed.). McGraw-Hill.

Solís Pérez, Y. Y., Gómez-Mellado, A. Y., Morales-Bautista, C. M., Méndez-Olán, C., Lobato-García, C. E., & Peña-Morán, O. A. (2019). Factibilidad ecológica de dos técnicas de remediación según las propiedades de un suelo aluvial contaminado con aguas congénitas. *Journal of Basic Sciences*, 5(15).

Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., S. F. de Araujo, A., & Singh, R. P. (2017). Agroecological responses of heavy metal pollution with special emphasis on soil health and plant performances. En *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 5, Número 64). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00064>

Steffan, J. J., Brevik, E. C., Burgess, L. C., & Cerdà, A. (2017). The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 159–171. <https://doi.org/10.1111/ejss.12451>

Suarez, R., Arévalo, E., Linares, L., Ustáriz, F., & Hernández, G. (2009). Validación de un método analítico para la determinación de magnesio eritrocitario. *Avances en Química*, 4(2), 53–62.

Torregrosa, D., Gómez-Pertusa, C., Serrano, R., Grindlay, G., Gras, L., & Mora, J. (2021). *Beneficios de las interferencias espectrales y no espectrales en técnicas espectroscópicas de plasma*.

Triano Sánchez, A., Palma López, D. J., Salgado García, S., Lagunes Espinoza, L. C., & Córdova Avalos, V. (2016). Nutrición orgánica en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 9(12), 39–44.

Trucíos Caciono, R., Rivera González, M., Delgado Ramírez, G., Estrada Ávalos, J., & Cerano Paredes, J. (2013). Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 339–346.

United States Pharmacopeial Convention Inc. (2015). *United States Pharmacopeia 38 NF-33*.

UNODC, O. de las N. U. contra la D. y el D. (2010). *Directrices para la validación de métodos analíticos y la calibración del equipo utilizado para el análisis de drogas ilícitas en materiales incautados y especímenes biológicos*.

Van Reeuwijk, L. P. (1999). Procedimientos para análisis de suelos (clasificación y correlación). Trad. al español por MC Gutiérrez Castorena, CA Tavares E. y CA

Ortiz Solorio. En L. P. Van Reeuwijk (Ed.), *Posgrado en Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Posgraduados (1ra en Español)*. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

<https://www.researchgate.net/publication/316451504>

Van Vliet, J. A., & Giller, K. E. (2017). Mineral Nutrition of Cocoa: A Review. En *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 185–270). Academic Press Inc.

<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017>

Vargas, J. R. (2018). *Extracción con fluidos supercríticos: aplicaciones de interés farmacéutico*.

Vargas Rojas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos de la FAO* (Cuarta). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). The incorporation of organic amendments in the form of compost and vermicompost reduces the negative effects of monoculture in soils. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 105–112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12>

Vázquez Vázquez, L. L., Ojeda Morales, M. E., Macías Valadez Treviño, M. E., Sánchez Lombardo, I., Macías Valadez, M. Z., Méndez Olán, C., & Morales Bautista, C. M. (2021). Fracciones de hidrocarburos en la evaluación del impacto ambiental de suelos contaminados. *Avances de Investigación en Ingeniería Aplicada*, 664.

Velandia Cabra, J. R. (2018). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5, 115–140.

<https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>

World Health Organization. (2010). *International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides Guidelines for the Registration of Pesticides* (Dr. M. Zaim/WHOPEs, Ed.). World Health Organization.

Yzquierdo Ruíz, M. M., Torres Sánchez, S. A., De la Garza Rodríguez, I. M.,

Ojeda Morales, M. E., Hernández Nuñez, E., Lobato García, C. E., Hernández Rivera, M. A., Zurita Macías, M., & Morales-Bautista, C. M. (2022). Pre-evaluation of contaminated soil for oil field reactivation in Moloacan, Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(2).

<https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2753>

Zavala Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma López, D., Bautista Zúñiga, F., & Reyes, F. G. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 161–171. www.ujat.mx/era161