



**“SÍNTESIS DEL GEL DE CARBOXIMETILCELULOSA  
PARA ABSORCIÓN DE HIDROCARBURO EN SUELO  
CONTAMINADO”**

**TESIS**

**Presenta:**

**Carol Sthephanie Burnett Pérez**

**Director de tesis:**

**Dra. Rocío Del Carmen Antonio Cruz**

**Codirector de tesis:**

**M.I.P.A. María Berzabé Vázquez González**

**Villahermosa, Tabasco**

**Septiembre 2019**

# AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por haberme guiado a lo largo de mí formación profesional. Por brindarme apoyo y fortaleza en los momentos más difíciles y llenar mi vida de aprendizajes y grandes experiencias.

**A MIS PADRES:** María Isabel Pérez Abreu, por permitirme ser alguien en la vida al darme la oportunidad de subir mi nivel educativo y por su apoyo incondicional.

A mi padre Otoniel Amésquita Pérez por alentarme a que siga con mis estudios y motivarme a superarme día a día, por sus sabios consejos y por su apoyo incondicional.

**A MI HERMANA:** Consuelo Alejandra Amésquita Pérez por su apoyo, cariño y comprensión que me ha brindado siempre, en las alegrías y tristezas, por ser mi amiga y hermana, por cuidarme.

**A MI NOVIO:** José Alexis Fabres Sánchez por estar conmigo en las buenas y en las malas y brindarme su apoyo cuando lo he necesitado.

**A LA DOCTORA ROCIO DEL CARMEN ANTONIO CRUZ:** por darme la oportunidad de trabajar con ella, por compartir un poco de todo su conocimiento conmigo, por su paciencia y tolerancia durante el proceso de la maestría.

## RESUMEN

En química el término hidrocarburo se define como una sustancia o compuesto de origen químico que resulta de la combinación o la mezcla del carbono con el hidrógeno, de este compuesto se obtiene las principales fuentes de energía, sin embargo, también son la principal fuente de contaminación debido a los derrames petroleros.

En los últimos años se ha incrementado la tasa de contaminación provocada por el derrame de hidrocarburos, incentivar a la realización de investigaciones que permitan mitigar el deterioro provocado al medio ambiente.

En esta investigación se elaboró un gel de carboximetilcelulosa con la finalidad utilizarlo como medio de extracción para un suelo contaminado con hidrocarburo, se llevó a cabo la elaboración de gel de carboximetilcelulosa para integrarla como tratamiento de remediación.

Posteriormente se recolecta una muestra de suelo contaminado con hidrocarburo proveniente del pozo Terra 123, en el laboratorio la muestra se sometió a procesos para la efectividad del estudio, primeramente, se disminuyó la partícula de suelo mediante el tamizado de la muestra, se determinó el contenido de humedad posteriormente se llevaron a cabo los análisis previos al tratamiento.

Se determinó que el suelo utilizado para el análisis inicialmente contenía 0.99037 Mg/k de hidrocarburo, 9.6% de grasa analizado mediante el método Soxhlet, para la obtención del gel fue utilizada carboximetilcelulosa, glutaraldehído como agente entrecruzante y ácido clorhídrico como catalizador.

Las películas fueron caracterizadas por espectroscopia de infrarrojo (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Se aplicó el tratamiento por un periodo de tres meses, transcurrido el tiempo se realizaron los análisis nuevamente, los cuales mostraron que hubo un aumento en el nivel de hidrocarburo, al igual que el contenido de humedad y la cantidad de grasas.

## ABSTRACT

In chemistry the term hydrocarbon is defined as a chemical substance or compound resulting from the combination or mixture of carbon hydrogen, from this compound is obtained the main sources of energy, however, they are also the main source of pollution due to the oil spills.

In recent years, the cup of pollution caused by the hydrocarbon spill has increased, encouraging research to mitigate the deterioration caused to the environment.

In this research a carboxymethylcellulose gel was developed with the purpose of using it as a means of extraction for a soil contaminated with hydrocarbon, the production of carboxymethylcellulose gel was carried out to integrate it as a treatment of remediation.

Subsequently a sample of hydrocarbon-contaminated soil from the Terra 123 well is collected, in the laboratory the sample was subjected to processes for the effectiveness of the study, first, the soil particle was decreased by sieving the the moisture content was subsequently determined, pre-treatment analyses were carried out.

It was determined that the soil used for the analysis initially contained 0.99037 Mg/k hydrocarbon, 9.6% fat analyzed using the Soxhlet method, carboxymethylcellulose, glutaraldehyde was used as an interbinding agent and hydrochloric acid as a catalyst.

The films were characterized by infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). Treatment was applied for a period of three months, after the time the analyses were performed again, which showed that there was an increase in the level of hydrocarbon, as well as the moisture content and the amount of fats.

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>I. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	4
1.1 Carboximetilcelulosa (CMC) .....	4
1.2 Hidrocarburos .....	5
1.3 Derrames petroleros .....	8
1.5 Geles .....	10
1.6 Antecedentes.....	11
<b>II. METODOLOGIA</b> .....	16
2.1 Área de muestreo .....	16
2.3 Muestra número uno.....	17
2.4 Muestra número 2 .....	17
2.5 Síntesis de las películas de carboximetilcelulosa (CMC): .....	18
2.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) .....	19
2.7 Preparación del suelo .....	21
2.8 Determinación del contenido de humedad.....	22
<b>III. RESULTADOS</b> .....	27
3.1 Análisis previos al tratamiento .....	27
3.1.1 Determinación de hidrocarburos .....	27
3.3.1 Espectroscopia de infrarrojo.....	31
3.4.1 Extracción de grasas método Soxhlet .....	36
3.4.2 Determinación de humedad .....	37
3.4.3 Análisis de caracterización .....	37
<b>IV. CONCLUSIÓN</b> .....	38
<b>VI. BIBLIOGRAFIA</b> .....	40
<b>VII. ANEXOS</b> .....	42

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Estructura de la carboximetilcelulosa	4
Figura 1.2	Molécula de hidrocarburo	6
Figura 1.3	Petróleo crudo	7
Figura 1.4	Oleoductos	7
Figura 1.5	Derrame petrolero en agua	8
Figura 1.6	Derrames en suelo	9
Figura 1.7	Remediación de suelos	10
Figura 1.8	Estructura entrecruzada del gel	11
Figura 2.1	Pozo Terra 123	16
Figura 2.2	Profundidad de muestreo	17
Figura 2.3	Reacción de CMC	18
Figura 2.4	Película de carboximetilcelulosa	19
Figura 2.5	Muestra para triturado	21
Figura 2.6	Muestra tamizada	22
Figura 2.7	Termobalanza Larem	23
Figura 2.8	Disolución con las muestras	23
Figura 2.9	Filtrado de los sustratos	24
Figura 2.10	Equipo Infracal	24
Figura 2.11	Equipo Soxthelt	25
Figura 3.1	Espectro de infrarrojo	32
Figura 3.2	Micrografías de las películas CMC	33

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Usos industriales de la carboximetilcelulosa	5
Tabla 3.1	Cantidad de hidrocarburos muestra 1	34
Tabla 3.2	Contenido de hidrocarburo muestra 2	36
Tabla 3.3	Cantidad de hidrocarburos post-tratamiento muestra 1	40
Tabla 3.4	Cantidad de hidrocarburos post-tratamiento muestra 2	41

# INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son los productos del petróleo con más demanda en el mundo, ya que son los principales generadores de energía para el ser humano.

Entre los más graves desastres ambientales que atentan contra la biodiversidad se encuentran los derrames de petróleo, se estima que tres mil ochocientos millones de litros entran cada año a los océanos como resultado de las actividades humanas, de éstos, sólo ocho por ciento se debe a fuentes naturales (GREEN PEACE, 2012).

En un informe de biodiversidad en el 2006, publicó que México en el 2002, derramaron 160 barriles de hidrocarburo, ampliando así la superficie de suelo, contaminado. Por otro lado, la Procuraduría de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2016), publicó que, en el estado de Tabasco, tan sólo en los últimos 11 años, se han registrado un total de 385 derrames de hidrocarburos.

García y col. en el 2010, realizaron un estudio sobre remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en un suelo contaminado con petróleo crudo, utilizaron dos tipos de residuos agroindustriales, la cachaza y el bagazo de caña de azúcar como enmiendas y texturizante, donde la cachaza resulto altamente efectiva para la remoción de hidrocarburos HAP y HTP, obteniendo resultados semejantes con el bagazo de caña de azúcar. Por otro lado, la cachaza además de obtener buenos resultados en la reparación tiene como ventaja adicional el aporte de microorganismos al suelo los cuales tiene la capacidad de biotransformar los tóxicos y aportar nutrimentos en mayor concentración.

En el Instituto Tecnológico de Durango en el 2011 se realizó la evaluación del proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo empleando lodos residuales (biosólidos), provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas, como fuente alterna de macro y micronutrientes, la cual tuvo como resultado que los lodos residuales son una alternativa viable para la remoción de hidrocarburos de petróleo, además de ser una



fuente alterna de nutrientes, mencionando también que la mineralización o madurez de los lodos influyó en la tasa de remoción de hidrocarburos (Martínez y col. 2011).

Ordaz y col., en el 2011, realizaron pruebas de biorremediación a nivel microcosmos a un suelo arcilloso, contaminado con petróleo crudo, con diferentes concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y utilizaron como texturizante y enmienda al bagazo de caña, siendo el bagazo de caña, una alternativa rentable para el desarrollo del microcosmo, además de ser efectivo en la remoción de HTP.

Al obtener resultado favorable con este tipos de técnicas, en Perú en el año 2013, el Laboratorio de Fertilidad de suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, realizó un experimento a nivel de bioensayo donde fue empleado estiércol y aserrines, teniendo como sustrato la planta indicadora de “maíz” (*Zea mays L.*), para la eliminación de hidrocarburos totales de petróleo, obteniendo como resultado que la mayor reducción en la concentración de hidrocarburos de petróleo la obtuvieron al utilizar el estiércol, sin embargo con el uso de aserrín también hay reducción de la concentración pero en menor cantidad (Buendía, 2013).

Por otro lado, el Instituto de Biotecnología y Ecología aplicada de la Universidad Veracruzana, realizó una investigación, en la cual utilizaron lombrices de tierra endógena (*Pontoscolex corethururs*) para la remoción del hidrocarburo poliaromático Benzo(a) Pireno, afirmando que la especie endógena *P. corethururs* puede ser utilizada en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos poliaromáticos en zonas tropicales (Hernández, 2013).

Quijano en el 2015, llevó a cabo un estudio cuyo objetivo fue evaluar la degradación de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en suelo contaminado, bajo condiciones de vivero. En el cual se sembraron dos especies arbóreas *Swietenia macrophylla* (caoba) y *Tabebuia rosea* (macuilís) en combinación con vermicomposta de guano de murciélago, y compostas de cachaza y de estiércol de borrego en diferentes dosis, siendo la especie *S. macrophylla* y *T. rosea*, la que mejora los mejoran los

parámetros químicos del suelo, ayudando a la restauración de un suelo contaminado.

El proyecto tiene como objetivo determinar la cantidad de absorción de hidrocarburo en el gel carboximetilcelulosa, a fin de documentar la mayor información posible de la capacidad de absorción del gel, realizando diversos análisis, donde los resultados constituirán una base de datos en la cual se informará de la capacidad de absorción del gel y el uso que se le puede dar.

# I. FUNDAMENTO TEÓRICO

## 1.1 Carboximetilcelulosa (CMC)

La carboximetilcelulosa (**CMC**) o carmelosa es un compuesto orgánico y su estructura es similar a la celulosa, pero a diferencia de ella, es soluble en agua, se presenta como un polvo granuloso, blanco o casi blanco, higroscópico tras su desecación. La CMC es un derivado de la celulosa, compuesto por grupos carboximetil como se muestra en la figura 1.1, enlazados con algunos grupos hidroxilo, que se encuentra presente en el polímero.

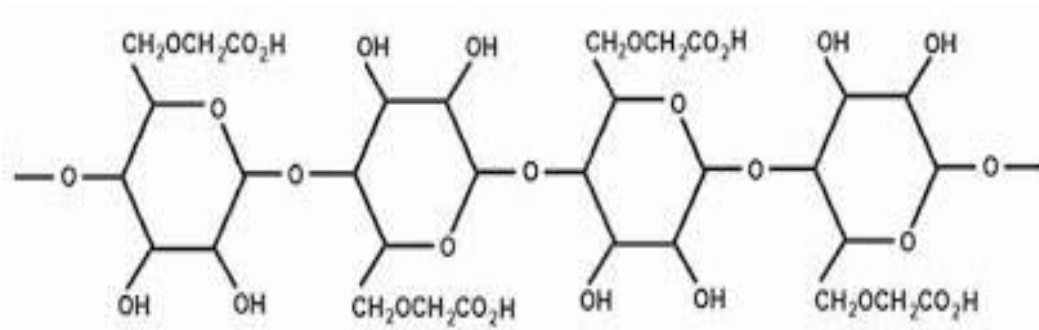


Figura 1.1 Estructura de la carboximetilcelulosa

Dentro de sus propiedades físicas más importantes se encuentra su carácter hidrofílico de acción, su alta viscosidad en soluciones diluidas, siendo prácticamente insoluble en acetona, etanol y tolueno, tiene también usos similares a la metilcelulosa, tiene la capacidad de formar geles con buena consistencia, pero sin una gran transparencia y de color pardo acaramelado con una gran adhesividad, lo que les hace muy útiles como excipientes semisólidos bucales.

La CMC pueda ser utilizada en diversas áreas a nivel industrial los cuales se mencionan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Usos industriales de la Carboximetilcelulosa

Aplicación	Dispersante	Colide protector	Retenedor de agua	Espesante	Formador de películas
Pinturas basadas en agua	x	x	x	x	x
Productos para la construcción	x		x	x	
Adhesivos para empapelar paredes				x	x
Recubrimiento de papeles	x	x		x	x
Detergentes		x		x	
Emulsionantes		x		x	
cerámica	x	x	x	x	x
Tabaco					x
Cosméticos y farmacéuticos	x	x	x	x	
Productos alimenticios	x	x	x	x	x
Lodos petroleros		x	x	x	

## 1.2 Hidrocarburos

Se conoce como hidrocarburo al compuesto de tipo orgánico que surge al combinar átomos de hidrógeno con otros de carbono como se muestra en la figura 1.2. Estas cadenas de átomos de carbono pueden ser abiertas o cerradas y lineales o ramificada.

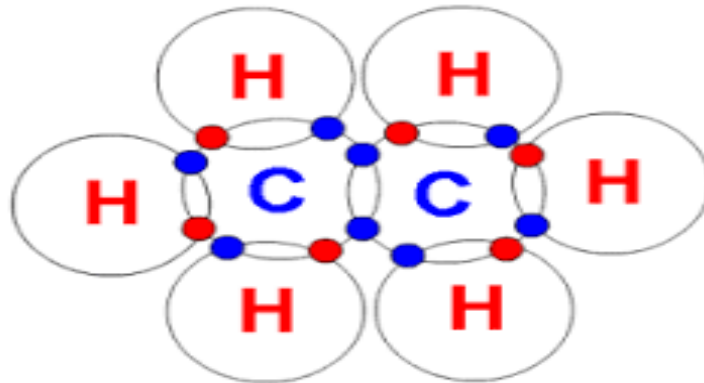


Figura 1.2. Molécula de hidrocarburo

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan, determinando su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes.

En su mayor parte, los hidrocarburos provienen del petróleo (ver Fig. 1.3). Debido a que el petróleo es el resultado de la descomposición de materia orgánica y por lo tanto este ofrece gran cantidad y concentración de carbono e hidrógeno.

Siendo estas partes de una industria muy importante para la economía ya que a partir de ellos se obtienen combustibles fósiles, utilizados en la industria para producir lubricantes, plásticos y otros productos.

Dentro de las principales características cabe resaltar que su punto de ebullición aumenta a medida que aumenta el tamaño de la molécula, su densidad también aumenta cuando la molécula es de mayor tamaño, son insolubles en agua, debido a que son sustancias polares, es decir que las cargas eléctricas de cada molécula están separadas, en su mayoría son utilizados como combustibles, son altamente contaminantes y tóxicos.



Figura 1.3. Petróleo crudo

Forman parte de las principales fuentes de contaminación de suelos y aguas del mundo, debido a los accidentes producidos durante su transportación, usualmente se transporta por medio de oleoductos como se muestra en la figura 1.4 sin embargo un volumen sustancial del petróleo que llega a los mercados es transportado por buques tanque o carreteras.



Figura 1.4. Oleoductos

### 1.3 Derrames petroleros

Un derrame de petróleo también conocido como marea negra se produce por un vertido de hidrocarburo como se observa en la figura 1.5, que se produce debido a un accidente o práctica inadecuada que contamina el medio ambiente.



Figura 1.5. Derrame petrolero en agua

Estos derrames afectan todo el ecosistema donde se produce el derrame lo cual perjudica gravemente la fauna y flora con efectos que pueden llegar a ser muy persistentes en el tiempo.

Los derrames de petróleo también ocasionan modificaciones en los trayectos migratorios de las especies, y hasta desaparición de las mismas de sus lugares de origen. La contaminación por hidrocarburos ocurre por derrames en operaciones de transporte, de carga y descarga, fugas de conductos o instalaciones industriales y accidentes.

El derrame de petróleo afecta la estructura del suelo como se muestra en la figura 1.6, aumenta su capacidad de retención de agua, en la capa superficial los hidrocarburos disminuyen el pH del suelo, aumenta el manganeso, hierro y

fósforo disponible., volviéndolo ácido y por lo tanto menos apto para el cultivo o el crecimiento de plantas silvestres.



Figura 1.6. Derrames en suelo

Debido a los cambios drásticos que se producen tras el derrame se han implementado diversas formas de recuperación, con la finalidad de restaurar el territorio afectado.

#### **1.4 Remediación de suelo**

La remediación es el tratamiento o conjunto de operaciones que se realizan con el objetivo de recuperar la calidad del subsuelo contaminado como se muestra en la figura 1.7, existen diferentes técnicas que permiten la recuperación del suelo para su aprovechamiento y garantizar la salud de las personas y de los ecosistemas.

Las técnicas de remediación se aplican en función del tipo de sustancia contaminante, los sistemas de tratamiento se pueden clasificar en tres puntos principales.

Primeramente la no recuperación, para el cual debe modificarse las propiedades del suelo y delimitarse perfectamente el espacio afectado, además de efectuarse



monitoreos que aseguren la imposibilidad de afectaciones a terceros, en segundo lugar esta al aislamiento de la contaminación, el aislamiento consiste en establecer medidas correctas de seguridad que impida la progresión de la contaminación y mitigando los efectos adversos relacionados con la dispersión de sustancias contaminantes y por último la recuperación, las medidas de recuperación se dividen en tratamiento in situ, que implica la eliminación de contaminantes sin sacar el terreno, y ex situ donde el material a tratar se lleva a un espacio confinado o se trata en instalaciones adecuadas.

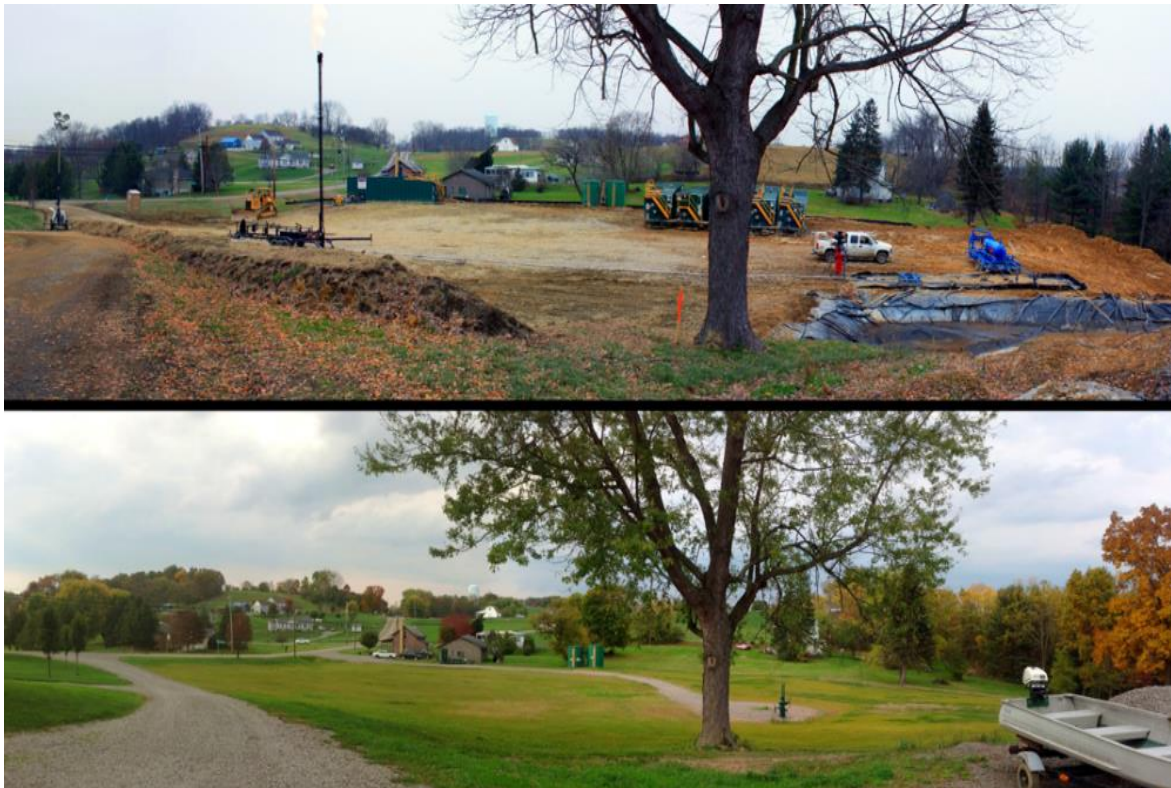


Figura 1.7 Remediación de suelos

## 1.5 Geles

Un gel es un material hecho a partir de polímeros entrecruzados con forma de red, de carácter hidrofílico, es decir, tiene la capacidad de repeler líquidos.

Los geles se pueden clasificar en dos tipos, y en función de la naturaleza de las uniones de la red tridimensional que los constituyen.

- (1) Geles químicos: Son aquellos en los que la red está formada a través de enlaces covalentes. Este tipo de enlace es muy fuerte y su ruptura conduce a la degradación del gel como se muestra en la figura 1.8.
- (2) Geles físicos: Solo presentan una red tridimensional formada por uniones que no son completamente estables. Generalmente, las uniones son del tipo de Van Der Waals, muchos más débiles que las uniones covalentes.

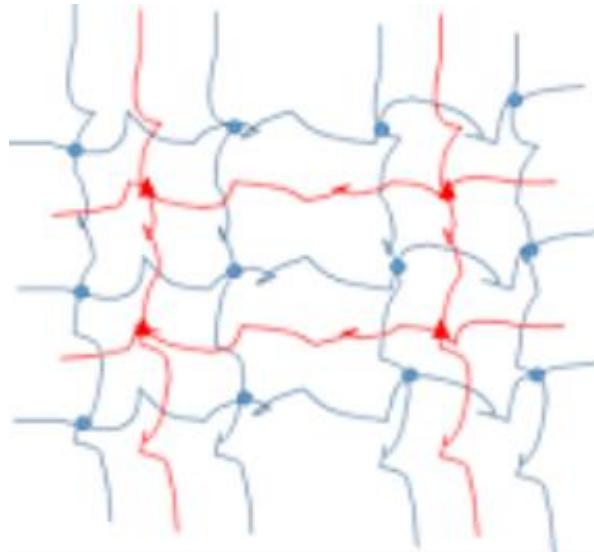


Figura 1.8. Estructura entrecruzada del gel

## 1.6 Antecedentes

García y col., en el 2010 realizaron un proyecto cuyo objetivo fue determinar la eficiencia de remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) de un suelo contaminado con petróleo crudo, utilizando dos tipos de residuos agroindustriales, la cachaza y el bagazo de caña de azúcar como enmiendas y texturizante. Para ello, se realizaron pruebas en

microcosmos de cultivos sólidos para la biorremediación de un suelo contaminado con 14 300 mg kg<sup>-1</sup> de HTP y 23.14 mg kg<sup>-1</sup> de HAP.

Las relaciones en porcentaje (%) de **suelo: residuo** utilizadas en las pruebas fueron las siguientes: 100:0, 98:2, 96:4 y 94:6, y la adición de macronutrientes con base en la relación carbono/nitrógeno/fósforo de 100/10/1. El análisis estadístico indicó que hay diferencias significativas entre algunos de los tratamientos de remoción al utilizar cachaza y el bagazo de caña. La remoción de HTP fue de 60.1 % para bagazo y de 51.4 % para cachaza. Con cachaza en una relación 96:4 se logró una remoción de 43 % de HAP, mientras que el bagazo en una relación 98:2 removió 41 %. La cachaza resulta ser una alternativa para ser utilizada en los procesos biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Buendía en el 2012, realizó un estudio en cual utilizo estiércol y aserrines como sustrato a la planta indicadora de "maíz" (*Zea mays L.*), sembrados y controlados por un periodo de dos meses. Tomando como referencia de muestra 36 macetas en los cuales se evaluaron 12 tratamientos con tres repeticiones cada uno, obteniendo como resultados un promedio de disminución del 22.5% del contenido de hidrocarburos en el suelo, empleando solo estiércol disminuyó 16.5% y usando solamente aserrines disminuyó 9.6%.

Realizaron una comparación de los tratamientos del experimento llegando a la conclusión que el mejor resultado proviene del tratamiento 3, el cual consistió en suelo contaminado adicionando estiércol y aserrín de bolaina, puesto que la concentración inicial de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) fue de 21.81 g de TPH/kg de suelo, disminuyó en 16.28 g de TPH/kg de suelo, que representa una reducción del 25%.

Arrieta y col., en el 2010 realizaron un estudio en el cual se aisló y caracterizó bioquímica y molecularmente consorcio bacteriano capaz de degradarlos diferentes hidrocarburos presentes en el diésel, conformado por los géneros: *Enterobacter sp*, *Bacillus sp*, *Staphylococcus aureus*, *Sanguibacter soli*, *Arthrobacter sp*, y *Flavobacterium sp*, utilizando suelo contaminado con diésel a escala laboratorio, utilizaron dos tecnologías de biorremediación: atenuación natural y bioestimulación.

Definieron como parámetro de control la concentración de hidrocarburos totales (HTP) concluyendo con la reducción en la concentración en un periodo de 4 meses de 36.86% para la atenuación natural y 50.99% para la bioestimulación.

Anza y col., en 2016 realizaron una investigación donde utilizaron biopilas como método de biorremediación de suelo contaminado con aceites usados de talleres de servicio automotriz. Emplearon cuatro muestras de suelo proveniente de la Unidad de Manejo Ambiental (uma) «La Huella» ejido Pedro Méndez, Chiapa de Corzo, Chiapas, México; las cuales se caracterizaron en laboratorios de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y El Colegio de la Frontera Sur, de las cuales analizaron humedad, materia orgánica, textura, pH, temperatura, nitrógeno total y fósforo, construyeron cuatro biopilas, desarrollando tres tratamientos con tres repeticiones y un testigo, las cuales fueron contaminadas en concentraciones para el testigo de 30,000 ppm, para primer tratamiento 10,000 ppm, para segundo 30,000 ppm y para tercero de 50,000 ppm de hidrocarburos totales del petróleo (htp).

Las cepas que utilizaron fueron: *Acinetobacter Sp.*, *Sphingobacterium Sp.* y *Stenotrophomona Sp.*; con concentración de  $2.25 \times 10^8$  unidades formadoras de colonias para cada tratamiento. Concluyeron que el tratamiento obtuvo altos porcentajes de remoción de las fracciones alifática de 93.7 a 87.1% y en la fracción aromática de 0 a 94.8 en 90 días de tratamiento, con aplicación de bacterias biorremediadoras e identificación de cepas bacterianas nativas del suelo que lograron resistir el cambio en su ambiente.

Martínez y col., en el 2011, realizaron una investigación en la cual evaluaron el proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo empleando lodos residuales (biosólidos), provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) doméstica, como fuente alterna de macro y micronutrientes.

En el estudio se realizaron experimentos a escala laboratorio y piloto, ajustados a capacidad de campo y una relación carbono:nitrógeno (C:N) = 10:1, en los cuales se evaluaron el efecto de la adición de nutrientes, la densidad del material a remediar y la influencia del tamaño de la partícula en el proceso de degradación. Obteniendo como conclusión que los lodos residuales propiciaron la estimulación de los microorganismos nativos del suelo y estos últimos a su vez fueron los

responsables de degradar los hidrocarburos. El suelo sometido a remediación aeróbica alcanzó el límite máximo permisible (LMP) establecido en la normatividad mexicana vigente (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003).

Cartaya y col., en el 2011, realizaron un estudio en el cual se realizaron ensayos para estudiar la absorción y la distribución de metales pesados (Cu) en plántulas de tomates tratadas con polímeros naturales (oligogalacturónidos, Ogal) cultivadas en un medio con niveles tóxicos de cobre.

Analizaron los metales asimilables en el suelo con el fin de determinar el efecto residual y la movilidad de estos elementos. Al finalizar el estudio concluyeron que el empleo de la mezcla de oligogalacturónidos contrarresta el efecto de la toxicidad por metales pesados y produjo cambios en el patrón de acumulación de metales en las plantas tratadas con polímeros naturales, aun cuando la baja movilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados se deben principalmente a las características del suelo.

Manzano y col., en el 2011, llevaron a cabo una investigación en la cual analizaron el aprovechamiento del estiércol de vacuno en la descontaminación del suelo contaminado por diésel (1.4% en peso). Aplicando una metodología sencilla y barata, esta fue aplicada ex situ de suelos contaminados con diésel.

El factor principal para la realización del proyecto fue la caracterización inicial de la contaminación por hidrocarburos, pues la concentración inicial de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y la fracción de diésel en concreto puede determinar las dosis de estiércol y agua residual a aportar inicialmente.

La técnica de excavación y colocación del suelo en biopilas dio excelentes resultados en el proceso de biorremediación, ya depositado el suelo en las biopilas se procedió a regarlo con agua no-potable. El comportamiento de la descontaminación de un suelo contaminado por diésel mediante el empleo de biopilas con adición de estiércol de vacuno puede modelizarse mediante un tipo de

curva logística, y de este modo se estima que a los 183 días el 99.8% de diésel fue eliminado del suelo.

## II. METODOLOGIA

### 2.1 Área de muestreo

El área donde se realizó el muestreo se encuentra ubicada en el poblado Oxiacaque en el municipio de Nacajuca, Tabasco en las instalaciones del pozo Terra 123 (ver Fig. 2.1), donde ocurrió una explosión de unos de los ductos, dejando afectados de 120 a 160 m<sup>2</sup> del suelo industrial, así como zonas aledañas de suelo agrícola (PROFEPA, 2015).



Figura 2.1. Instalación del Pozo Terra 123

### 2.2 Clasificación de muestras

En este trabajo de investigación se utilizaron dos muestras, la muestra número uno se obtuvo de la el poblado Oxiacaque en el municipio de Nacajuca, donde en 2005 se registró un derrame petrolero. La muestra número dos recolectó dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Villahermosa.



### **2.3 Muestra número uno**

El muestreo del suelo se realizó utilizando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y, se seleccionaron dos puntos de muestreo, tomando una muestra con una pala a una profundidad de 30 cm como se muestra en la figura 2.2 y se colocaron en bolsas de plásticos transparentes para su transportación al laboratorio de Investigación II del Instituto Tecnológico de Villahermosa.



Figura 2.2. Área de muestreo

### **2.4 Muestra número 2**

El muestreo del suelo se realizó utilizando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 con un punto de muestreo dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Villahermosa. La muestra se tomó con una pala a una profundidad de 30 cm y se colocó en una bolsa de plástico transparente para su transportación al laboratorio de Investigación II del Instituto Tecnológico de Villahermosa. Además, se le adiciono 30 ml de hidrocarburo extra pesado, con la finalidad de obtener una muestra saturada con hidrocarburo.



## 2.5 Síntesis de las películas de carboximetilcelulosa (CMC):

Se realizó una disolución con 10 g de CMC en agua destilada para obtener una concentración de 5% en peso y se agitó con un agitador magnético mediante una parrilla eléctrica con agitación constante y temperatura controlada, una vez obtenida una mezcla homogénea se colocó en un reactor de vidrio con capacidad de 500 ml como se muestra en la figura 2.3 a una temperatura de 80°C por un periodo de 30 minutos con agitación constante.

Posteriormente, se le agregó 4 ml de glutaraldehído a una concentración de  $2.5 \times 10^{-3}$  como agente de entrecruzamiento y 4 ml de ácido clorhídrico con una concentración de  $1 \times 10^{-2}$  como catalizador, manteniendo constante la agitación durante 1 h a 80°C.

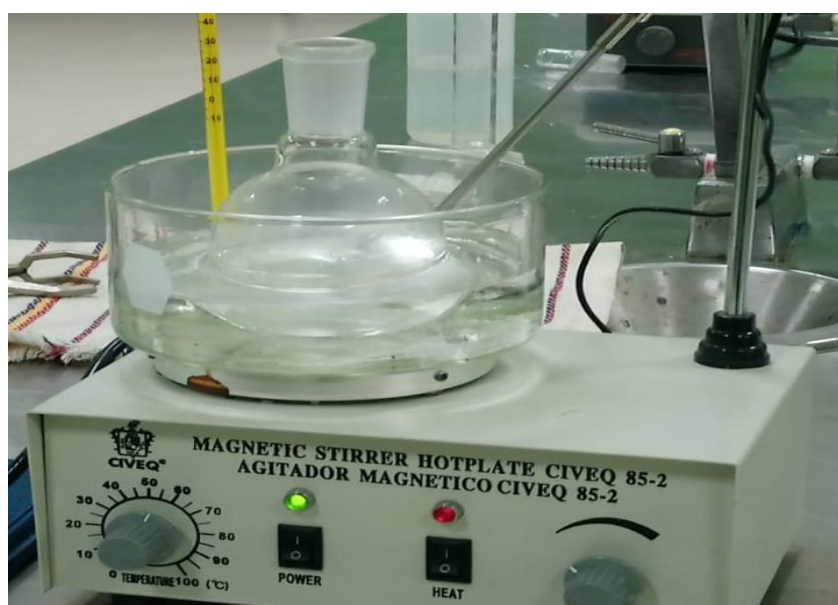


Figura 2.3. Equipo de síntesis del gel de CMC

Transcurrido el tiempo de reacción, la mezcla se colocó en moldes y se secaron en una estufa a 60°C durante 24 h, para obtener la película del gel de CMC.

Trascurrido el tiempo de secado, se retiró la película de los moldes para ser utilizada como tratamiento (ver Fig. 2.4).



Figura 2.4. Película de carboximetilcelulosa

## 2.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía de infrarrojo es una técnica que funciona con una pequeña muestra que es colocada en una celda infrarroja, donde es sometida a una fuente de luz infrarroja, la cual hace un barrido desde las longitudes de onda de  $4000\text{ cm}^{-1}$  hasta  $600\text{ cm}^{-1}$ .

La intensidad de la luz transmitida a través de la muestra es medida en cada número de onda, lo que permite que la cantidad de luz absorbida por la muestra sea calculada por la diferencia entre la intensidad de la luz antes y después de pasar por la celda de muestra.

En FTIR se adquieren simultáneamente todas las componentes de frecuencia del espectro, lo que permite acumular un gran número de espectros en poco tiempo, con la consiguiente mejora en la relación señal/ruido.

Esto es especialmente importante en las regiones del espectro infrarrojo en que la fuente tiene una emisión débil y/o el detector es poco sensible

La transformación de Fourier se usa como método matemático para el desarrollo en serie la curva obtenida, la principal ventaja de la transformada de Fourier es que tiene la capacidad de mejorar la resolución de los espectros y minimiza el tiempo de obtención de resultado, también se obtiene mayor sensibilidad, al mejorar la sensibilidad se obtiene como consecuencia una mayor energía de flujo del haz de luz hasta llegar al detector y de la mejora de la relación señal/ruido por promediación de interferogramas.

Los polímeros muestran grandes absorciones al ser expuestos al haz de luz durante los análisis, la posición de una banda de absorción infrarroja se identifica por la longitud de onda. El número de onda se define en  $\text{cm}^{-1}$  es la más común para identificar absorciones IR.

Este análisis se realizó a la película de carboximetilcelulosa para determinar los grupos funcionales característicos del polímero.

## **2.6 Microscopía electrónica de barrido (SEM).**

La Microscopía Electrónica de Barrido conocido como SEM, es una de las técnicas más rápidas para la visualización y análisis de las características microestructurales. Es una técnica que se basa en el principio de la microscopía óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones utilizada para la visualización y análisis de las características de muestras sólidas de alta resolución.

Esta técnica permite caracterizar polímeros determinando su forma, tamaño y distribución del material, lo cual es muy útil para realizar estudios de degradación, dispersión y compatibilidad entre las fases presentes.

Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra, la muestra está generalmente recubierta con una capa muy fina de oro o carbón, lo que le otorga propiedades conductoras.

Este análisis se realizó para determinar la fluctuación sobre la superficie de la CMC en forma de película.

## 2.7 Preparación del suelo

Se llevó a cabo mediante los lineamientos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

Las muestras se colocaron al sol para el secado por 12 horas, trascurrido ese tiempo se procedió al triturado utilizando un mortero y pistilo como se muestra en la figura 2.5 para disminuir la el tamaño de la muestra de suelo.



Figura 2.5 Muestra para triturado

Con la finalidad de tener una partícula uniforme se pasó la muestra triturada por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro aproximadamente (ver Fig. 2.6), este grado de fineza fue conveniente para la realización de los análisis pertinentes.

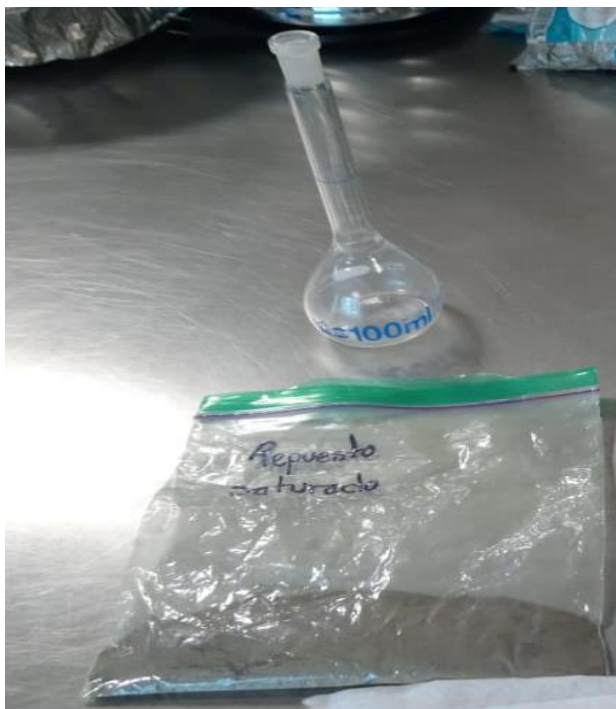


Figura 2.6. Muestra tamizada

## 2.8 Determinación del contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se agregó en un contenedor de aluminio 2 g de suelo tamizado, y posteriormente se colocó en la Termobalanza Labrem (ver Fig. 2.7) durante 10 minutos para su análisis.



Figura 2.7. Termobalanza Larem

## 2.9 Determinación de la cantidad de hidrocarburos

Se pesó 2 g de suelo previamente seco y tamizado y, se colocó en un matraz de 100 ml, los matraces se colocaron dentro de la campana de extracción, posteriormente se le agregó 25 ml de tetracloruro de etileno y se aforo con agua destilada, finalmente se dejó reposar durante 48 horas (ver Fig. 2.8).

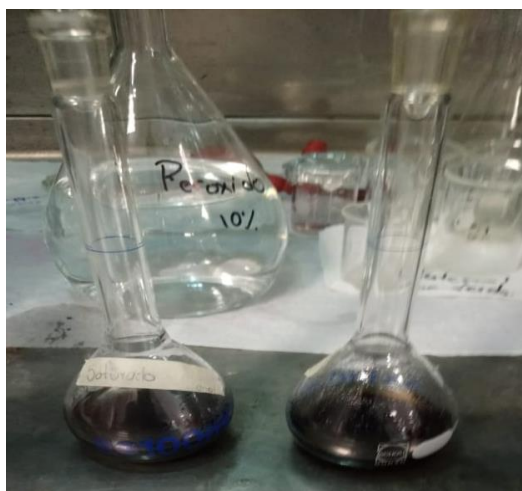


Figura 2.8. Disolución con las muestras

Trascurrido ese tiempo, se utilizó papel filtro sobre vasos de precipitado para eliminar las partículas más grandes y solo rescatar el sustrato, se filtraron los sustratos para obtener las muestras que se analizarían como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9. Filtrado de los sustratos

Se utilizó el método de espectroscopía de infrarrojo con el equipo INFRACAL (ver Fig. 2.10), este se encendió y se dejó calentar por 30 minutos.



Figura 2.10. Equipo INFRACAL



Se filtró el extracto con un filtro Whatman en forma de cono sobre un vaso de precipitado, después de los 30 min se procedió a calibrar el equipo leyendo dos veces la capsula con tetracloruro de etileno y uno con la muestra.

La muestra se analizó 5 veces para el registro de las absorbancias obtenida y proceder a realizar los cálculos que se observan en el capítulo de resultados.

## 2.10 DETERMINACION DE CANTIDAD DE GRASAS (SOXHLET)

Este análisis fue realizado siguiendo los lineamientos de la NMX-AA-134-SCFI-2006.

Se utilizó un matraz de fondo plano de 250 ml y se agregaron 90 ml de hexano. En la cápsula de celulosa (ver Anexo I) se agregó una mezcla homogénea de 10 g de muestra de suelo tamizado contaminado y 10 g de sulfato de sodio y, posteriormente se colocó en la corneta del equipo Soxhlet (ver Anexo II).

Una vez instalado el equipo Soxhlet (ver Fig. 2.11) correctamente se fijó una temperatura de 75°C en un periodo de 6 a 8 h, hasta que la muestra hiciera de 6 a 8 reflujos.



Figura 2.11. Equipo Soxhlet



Al finalizar el proceso se retiró el matraz y se colocó en una estufa a 60° centígrados durante 45 minutos para retirar el vapor remanente, transcurrido ese tiempo se puso en un desecador por 30 minutos y se pesó hasta un peso constante.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis previos al tratamiento

##### 3.1.1 Determinación de hidrocarburos

Se realizó un análisis al suelo previo al tratamiento con la finalidad de conocer la cantidad de hidrocarburos contenida en las muestras. Se utilizaron dos ecuaciones normadas, la primera se refiere a la conversión de los ml de tetracloroetileno obtenidos al correr las muestras en el INFRACAL a ml de suelo, la segunda se utilizó para convertir los ml de suelo en mg de hidrocarburo por kg de suelo. Los resultados obtenidos en el equipo INFRACAL de la muestra uno se muestra en la tabla 3.1.

Para obtener un resultado valido la muestra se corrió en el equipo cinco veces y posteriormente se obtuvo un promedio siendo este la cantidad de hidrocarburos.

**Tabla 3.1. Cantidad de hidrocarburos muestra 1**

CORRIDA PRE-TRATAMIENTO	CANTIDAD DE HIDROCARBURO
1	0.1
2	0.1
3	0
4	0
5	0
Promedio	0.04

Posteriormente se realizó una conversión de los ml de tetracloroetileno para obtener mg/l de suelo con la ecuación 1.

### (Ecuación 1)

$$C_o = \frac{(1.9807 * abs)}{[1 - (0.0016 * abs)]}$$

#### Donde:

- ✚ Co. es el nivel de concentración
- ✚ 1.9807. Valor dado por la norma
- ✚ 0.0016. valor dado por la formula
- ✚ abs. Absorbancia obtenida del INFRACAL

Sustituyendo en la ecuación uno se obtuvo un valor de 0.079 mg/l de suelo.

$$C_o = \frac{(1.9807 * 0.04)}{[1 - (0.0016 * 0.04)]} = 0.079 \frac{mg}{l}$$

Finalmente se realizó la conversión para obtener mg de hidrocarburo por kg de suelo utilizando sustituyendo en la ecuación número 2.

### (Ecuación 2)

$$M * \left(\frac{1}{1000}\right) * \left(\frac{25}{g \text{ de suelo}}\right) * 1000$$

#### Donde:

- ✚ M = ml de suelo obtenidos de la ecuación 2
- ✚ 25 ml de sustrato utilizado (tetracloroetileno)

Al sustituir en la ecuación 2 obtenemos 0.99 mg de hidrocarburo por kg de suelo para la muestra uno

$$0.079 * (0.001) * \left(\frac{25}{2}\right) * 1000 = 0.99 \text{ mg/kg}$$

De igual manera se realizó la determinación de hidrocarburos a la muestra número dos, y los resultados de los análisis de la muestra en el INFRACAL se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Contenido de hidrocarburo muestra 2**

CORRIDA PRE-TRATAMIENTO	CANTIDAD DE HIDROCARBURO
1	8.1
2	8.1
3	8.5
4	8.2
5	8.2
Promedio	8.18

Sustituyendo los datos obtenidos en la ecuación 1 obtenemos que la muestra dos contiene 16.41 mg/l de suelo.

$$C_o = \frac{1.9807 * 8.18}{[1 - (0.0016 * 8.18)]} = 16.41 \frac{mg}{l}$$

Para obtener los mg/kg de suelo se sustituyeron los resultados obtenidos de la ecuación 1, en la ecuación 2, obteniendo como resultado que la muestra dos contenía previo al tratamiento 205.21 mg de hidrocarburo por kg de suelo.

$$16.41 * (0.001) * \left(\frac{25}{2}\right) * 1000 = 205.21 \frac{mg}{kg}$$

### 3.1.2 Extracción de grasas por el método Soxhlet

La determinación de grasas se llevó a cabo mediante la diferencia de pesos entre el matraz antes del análisis y después del análisis al llevarlos a peso constante utilizando la ecuación 3 proporcionada por la norma.

#### (Ecuación 3)

$$MED = \frac{P2 - P1}{kg \text{ base húmeda}} * 100$$

Donde:

- ✚ MED. Cantidad de grasa
- ✚ P2. Peso final
- ✚ P1. Peso inicial
- ✚ Kg base húmeda (cantidad de muestra analizada)

Para realizar el método de extracción de grasas se llevaron los matraces utilizados a peso constante, el matraz designado a la muestra uno tubo un peso inicial de 103.51 g, teniendo un peso final de 106.20 g

Sustituyendo en la ecuación 3 el matraz de la muestra número uno contenía 26.9% de grasa antes ser colocados en al equipo Soxhlet.

$$MED = \frac{106.20 - 103.51}{10} * 100 = 26.9\%$$

Para la muestra dos se repitió el mismo procedimiento de peso constante obteniendo un peso inicial de 104.18 g, teniendo un peso final de 112.22 g,

sustituyendo en la ecuación 3 la cantidad de grasas obtenida del matraz de la muestra dos fue del 80.4%.

$$MED = \frac{(112.22 - 104.18)}{10} * 100 = 80.4\%$$

### **3.1.3 Determinación de humedad**

La determinación de húmeda para la muestra uno y dos se realizó mediante la termobalanza Labren colocando 2 g de suelo en una charola para ser introducidas al equipo. Las muestras uno y dos contenía un porcentaje de humedad inicial de 5.66 %. Demostrando con esto, que tras el proceso de secado y tamizado se obtuvo el mismo contenido de humedad en las dos muestras.

## **3.2 Características del gel**

La película de gel de CMC mostro una tonalidad clara, con una superficie lisa, y con poca flexibilidad.

## **3.3 Análisis de caracterización**

### **3.3.1 Espectroscopia de infrarrojo**

En la figura 3.1 se muestra el espectro de infrarrojo de gel de CMC con glutaraldehído como agente entrecruzante y ácido clorhídrico como catalizador, con la finalidad de determinar los grupos funcionales contenidos en el gel antes de ser aplicado como tratamiento.

Se pueden apreciar los grupos funcionales característicos del material y en la longitud de onda de 3276 cm<sup>-1</sup> se observa una banda ancha y pronunciada debido

al grupo -OH característico en la estructura de la CMC, a  $2950\text{ cm}^{-1}$  se les atribuye a los grupos  $\text{CH}_2$ , a  $2358\text{ cm}^{-1}$  se debe a un estiramiento asimétrico del grupo -CO característico del  $\text{CO}_2$  presente en el medio ambiente al momento de la calibración del equipo, a  $1589\text{ cm}^{-1}$  se muestra un estiramiento del grupo carbonilo y en la banda de  $1417\text{ cm}^{-1}$  se le atribuye al grupo carboxilo. Por otro lado, a  $1323\text{ cm}^{-1}$  se observa una flexión del grupo  $-\text{CH}_2-$  y en la región de  $1027\text{ cm}^{-1}$  se debe al enlace C-C. Estos resultados son muy parecidos a los reportados por Purata en el 2008 y Cáceres 2019, quienes realizaron la identificación de diferentes grupos funcionales característicos de los componentes de los hidrogeles y concuerda con las bandas características del gel sintetizado en este trabajo de investigación.

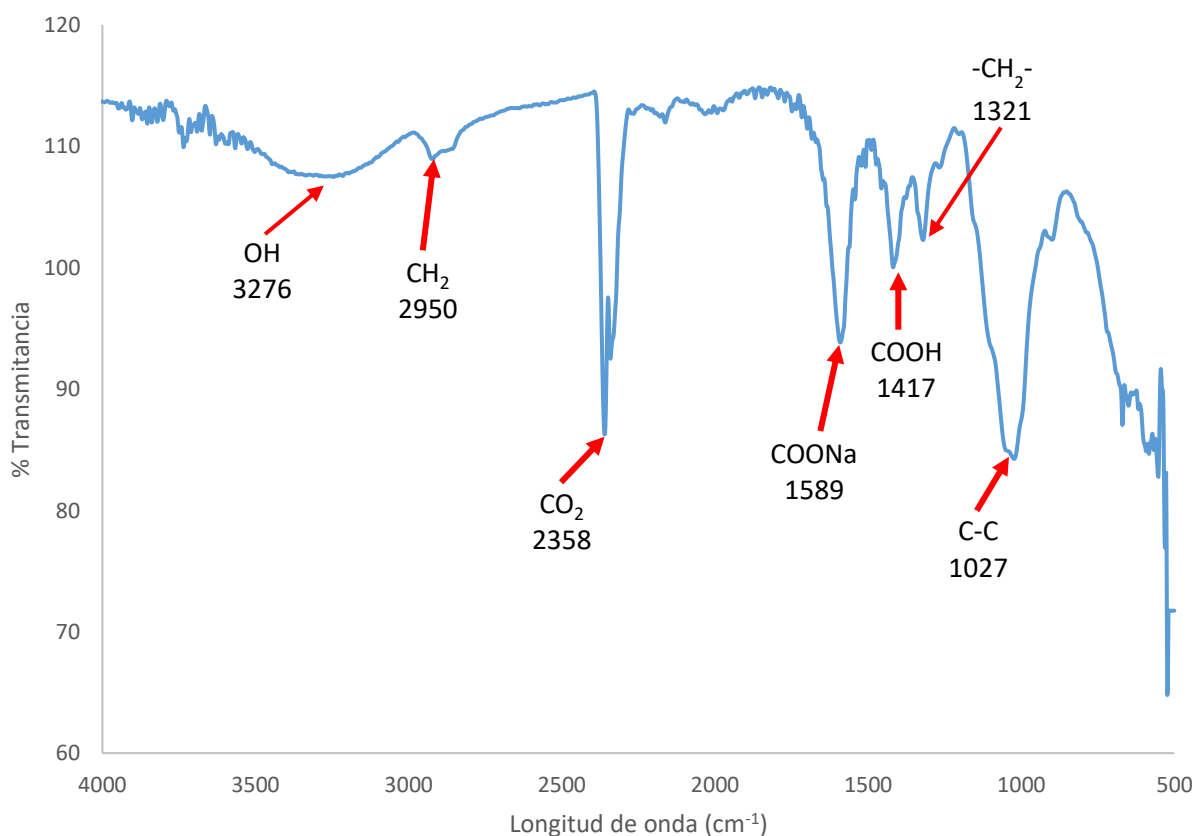


Figura 3.1. Espectro FTIR del gel de CMC

### 3.3.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM).

Esta técnica se utilizó con la finalidad de determinar la morfología de las películas de CMC. En la figura 3.2 se muestra los resultados obtenidos de la microscopia electrónica de barrido, donde se observa una morfología homogénea con una superficie lisa sin impurezas, y con pequeñas partículas que se le atribuyen a la CMC que no reacciono en la síntesis del gel de CMC.

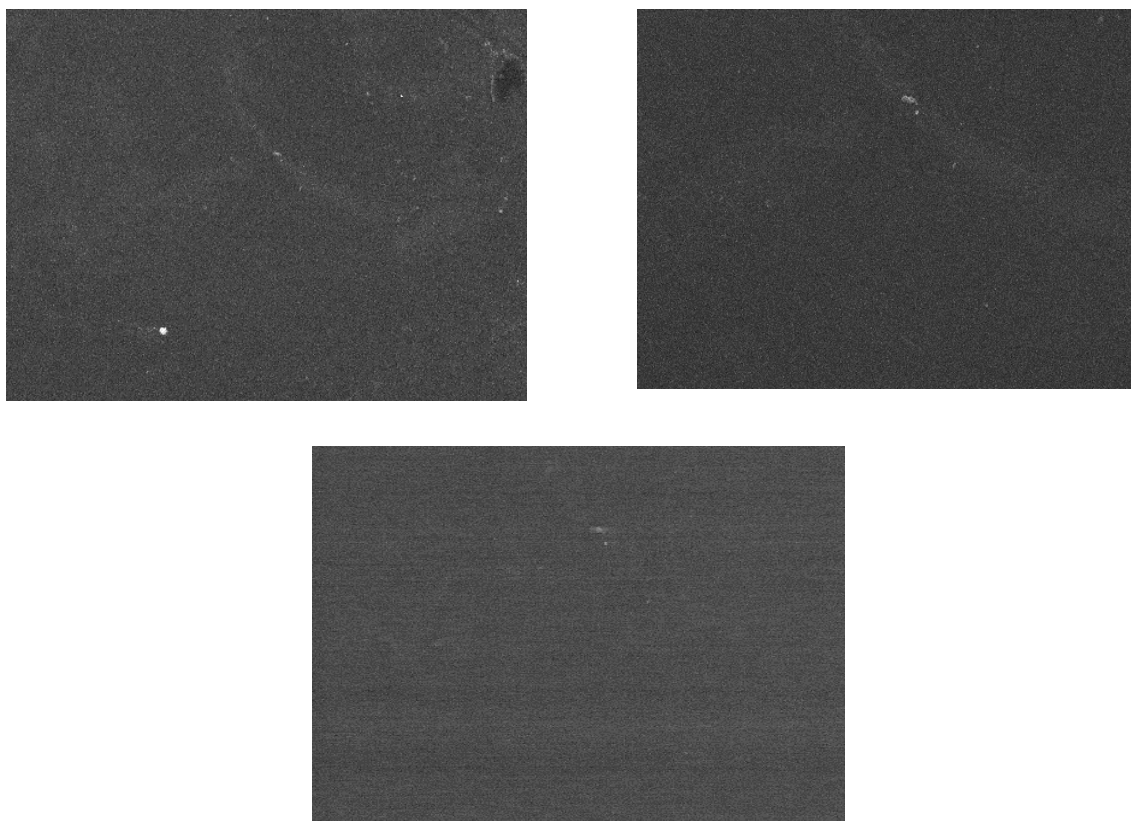


Figura 3.2. Micrografías de las películas del gel de CMC

### 3.4 Análisis post-tratamiento

Al retirar el tratamiento se realizó nuevamente análisis al suelo, con la finalidad de conocer la cantidad de hidrocarburos que fuera absorbida por el gel de CMC, los resultados de la muestra uno y dos se muestran en la tabla 3.3 y 3.4 respectivamente, el análisis fue realizado nuevamente por el equipo INFRACAL.



Para obtener un resultado valido la muestra se corrió nuevamente en el equipo cinco veces y posteriormente se obtuvo un promedio siendo este la cantidad de hidrocarburos.

**Tabla 3.3. Cantidad de hidrocarburos post-tratamiento muestra 1**

CORRIDA POST-TRATAMIENTO	CANTIDAD DE HIDROCARBURO
1	13
2	14
3	13
4	15
5	13
Promedio	13.6

Al observar los resultados y compararlos con los obtenidos antes de aplicar el tratamiento existe un incremento significativo, sustituyendo los datos obtenidos en la ecuación 1 obtenemos que la muestra uno después de retirar el tratamiento contiene 27.53 mg/l de suelo.

$$C_o = \frac{1.9807 * 13.6}{[1 - (0.0016 * 13.6)]} = 27.53 \frac{mg}{l}$$

Se sustituyeron los resultados obtenidos de la ecuación 1, en la ecuación 2, obteniendo como resultado que la muestra uno contenía al retirar el tratamiento 344.20 mg de hidrocarburo por kg de suelo.

$$27.53 * (0.001) * \left(\frac{25}{2}\right) * 1000 = 344.20 \frac{mg}{kg}$$

**Tabla 3.4. Cantidad de hidrocarburos post-tratamiento muestra 2**

CORRIDA POST-TRATAMIENTO	CANTIDAD DE HIDROCARBURO
1	59
2	58
3	56
4	57
5	58
Promedio	57.6

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 1 y 2

$$C_o = \frac{1.9807 * 57.6}{[1 - (0.0016 * 57.6)]} = 125.67 \frac{mg}{l}$$

$$125.67 * (0.001) * \left(\frac{25}{2}\right) * 1000 = 1570.88 \frac{mg}{kg}$$

Se puede notar un incremento en la cantidad de hidrocarburos al retirar el tratamiento, en comparación con García y col., en el 2010 cuyo proyecto mostró resultados favorables al analizar análisis pos-tratamiento. Este incremento, se le atribuye a la desintegración de la película de CMC durante el periodo de tratamiento con el hidrocarburo, generando así el aumento de carbono (C) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), debido a que la estructura de la CMC está compuesta de C, H<sub>2</sub> y Na.

### 3.4.1 Extracción de grasas método Soxhlet

La determinación de grasas una vez retirado el tratamiento se realizaron nuevamente por el método Soxhlet, primeramente, se llevaron los matraces de las muestras uno y dos a peso constante.

Para la muestra uno el matraz tenía un peso inicial de 103.51 g y un peso final de 106.20 g, sustituyendo los valores en la ecuación 3, la cantidad de grasa contenida en el post-tratamiento fue de 26.9%.

$$MED = \frac{(106.20 - 103.51)}{10} * 100 = 26.9\%$$

La muestra dos tenía un peso inicial de 103.82 g y un peso final de 107.16 g, sustituyendo los valores nuevamente en la ecuación 3, la cantidad de grasa contenida en el post-tratamiento fue de 33.36%.

$$MED = \frac{(107.16 - 103.82)}{10} * 100 = 33.36\%$$

La cantidad de grasas que contenían las muestras eran menor antes de aplicar el tratamiento, esto fue debido a que el gel de CMC se desintegro y paso a ser parte del hidrocarburo, por lo tanto, el tratamiento no funcionó de manera adecuada. Sin embargo, se observó de forma visual que la consistencia del hidrocarburo era menos densa y puede ser que la viscosidad del crudo este disminuyendo. Para confirmar esto, se deberá realizar un estudio de viscosidad del hidrocarburo al momento de incorporar el gel de CMC y determinar por reología si ocurre este fenómeno.

### 3.4.2 Determinación de humedad

Se realizó el retiro de las películas de CMC en el tratamiento y las muestras fueron introducidas de nuevo a la termobalanza Labrem con la finalidad de determinar el porcentaje de humedad, los resultados obtenidos mostraron que la muestra uno finalizó el experimento con 10.29% de humedad y la muestra dos 13.15%.

### 3.4.3 Análisis de caracterización

En la figura 3.3 se muestra el espectro de infrarrojo de la CMC post-tratamiento y se observa una banda amplia a  $3290\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al ensanchamiento del grupo  $\text{-OH}$ , a  $2880\text{ cm}^{-1}$  se aprecia otra banda debido al estiramiento de los grupos  $\text{CH}_2$ , una banda a  $1590\text{ cm}^{-1}$  asociada al grupo  $\text{C=O}$ , a  $1410\text{ cm}^{-1}$  se presenta un pico correspondiente al grupo  $\text{COOH}$ . Por otro lado, a  $1320\text{ cm}^{-1}$  se observa una flexión del grupo  $\text{-CH}_2\text{-}$  y en la región de  $1040\text{ cm}^{-1}$  se debe al enlace  $\text{C-C}$ .

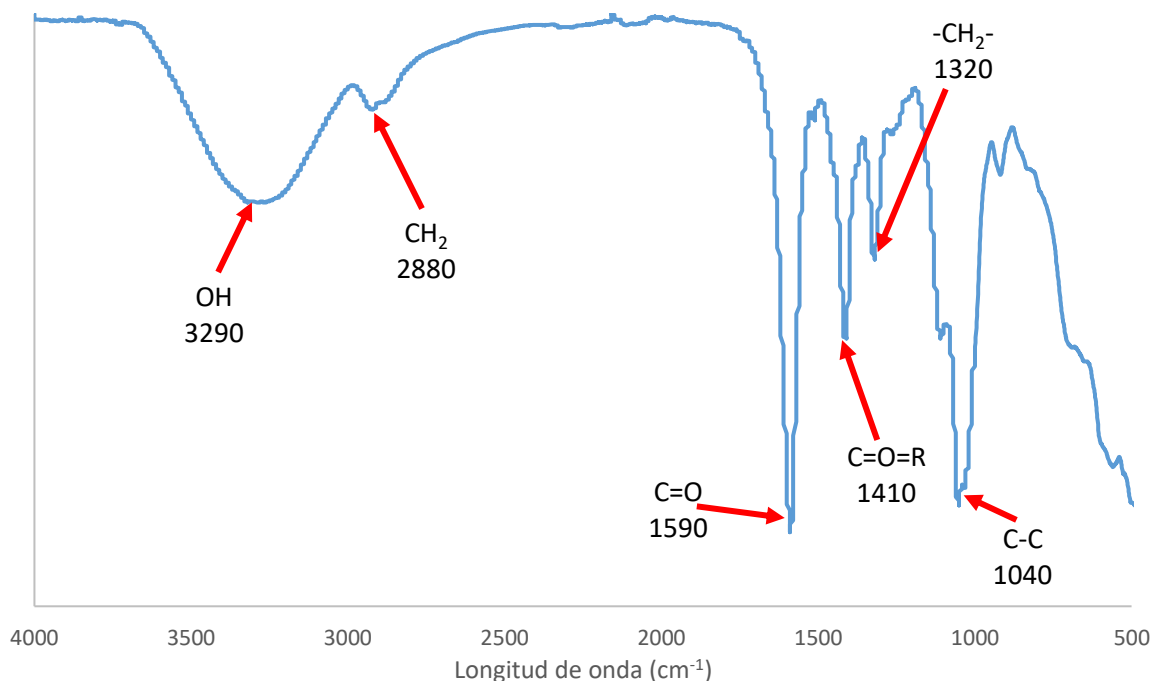


Figura 3.3. Espectro de la CMC post tratamiento

## IV. CONCLUSIÓN

La finalidad de este trabajo de investigación fue la incorporación de un gel de carboximetilcelulosa en un suelo contaminado con hidrocarburo y, determinar si puede ser empleado como un método para la remediación de suelo contaminado, que permita la recuperación del suelo para su posterior uso.

La metodología empleada y los resultados obtenidos de los análisis y caracterizaciones realizadas en este proyecto, se concluye lo siguiente:

- Es posible sintetizar un gel de CMC con características de absorción. Sin embargo, la película aplicada al suelo contaminado no redujo la cantidad de hidrocarburo que se encontraba contenido en el suelo durante los tres meses de exposición.
- Mediante los análisis de humedad y la determinación de grasas realizadas al retirar la película de CMC del post-tratamiento, se obtuvieron valores elevados a los iniciales.
- El contenido de hidrocarburo incremento durante el periodo de exposición al tratamiento.

## V. RECOMENDACIONES

Durante los estudios realizados en el proyecto de investigación se obtuvieron datos suficientes para hacer las siguientes recomendaciones:

- Ampliar el tiempo de exposición del gel de CMC con el suelo contaminado por hidrocarburo.
- Incorporar el gel de CMC a diferentes tipos de muestra.
- Utilizar el gel de CMC para disminuir la viscosidad del crudo pesado o extra pesado mediante pruebas reológicas.

## VI. BIBLIOGRAFIA

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-RETNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos.

Omar E. Cartaya., Inés Reynaldo, Carlos Peniche Y María. L. Garrido, (2010), empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados.

Hildebrando Buendía R. (2012), Rev. Del Instituto de investigación (riigeo), biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol.

Raquel Alonzo Riesco (2012), universidad autónoma de Barcelona, proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Nápoles<sup>1</sup>, J.; Marañón<sup>2</sup>, A.; Cumbá<sup>3</sup>, F.; Anllo, Y.<sup>1</sup>; Abalos<sup>1</sup> (2005), A, revista cubana de química, vol. xvii núm. 1 artículo: trazabilidad de suelos contaminados con petróleo aplicando microcosmos

Ignacio Daniel Coria, (2007), Ref. Ingeniería y gerenciamiento ambiental remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Oscar Ortíz Brito, Irina Ize Lema, Arturo Gavilán García, (2003). Gaceta ecológica. Número 69, la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México

Gregory Mejía Sandoval (2006), grupo de investigación inca-ces. Revista ces medicina veterinaria y zootecnia artículo: biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes,

Irene Ortiz Bernad, Juana Sanz García, Miriam Dorado Valiño, Susana Villar Fernández, (2011), Universidad de Alcalá del círculo de innovación en tecnologías medioambientales y energía (citme). Informe: técnicas de recuperación de suelos

Reyna García-torres<sup>1</sup>, Elvira Rios-leal, Ángeles Martínez-Toledo, Fernando Rafael Ramos-morales<sup>4</sup>, Jesús Samuel Cruz-sanchez<sup>5</sup> Y María Del Carmen Cuevas-díaz<sup>1</sup>: (2010) artículo. Uso De Cachaza Y Bagazo De Caña De Azúcar En La Remoción De Hidrocarburos En Suelo Contaminado.

Guillermina Pérez Casimiro, Rosario Iturbe Argüelles Y Rosa María Flores Serrano (2006). Instituto de ingeniería, universidad nacional autónoma de México artículo: cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación

Definiciona.com (2016). Definición y etimología de hidrocarburo. Bogotá: E-Cultura Group. Recuperado de <https://definiciona.com/hidrocarburo>.

Lozada, Jefferson, donado Rafael, Rodríguez Héctor, (2013) universidad tecnológica de panamá, ciencia de los materiales espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier presentado

Tejada Tovar Candelaria, Paz Astudillo Isabel, Villabona Ortiz Angel, Espinosa Fortich María, López-Badel Cristina, (2017) Universidad de Cartagena, Colombia Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa.

Purata, Caceres, (2009). Instituto tecnológico de Villahermosa

Melis Tufan, Emre Uraz, Caglagul Tosun, Hasanferdi Gerce, (2016). Synthesis and characterization of carboxymethyl cellulose film from pistachio shells, Universidad Anadolu, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química.



## VII. ANEXOS

### ANEXO 1. Cartuchos de extracción de celulosa



### ANEXO 2. Corneta y cartucho

