Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

División Académica de Ciencias Biológicas

"Estudio en la duda, acción en la fe"

TRATAMIENTO IN-SITU POR DESORCIÓN ALCALINA MÁS ENMIENDA ORGÁNICA EN SUELO HIDROFÓBICO CONTAMINADO CON HIDROCARBURO EN BEMIDJI, MINNESOTA

TESIS

Para obtener el título de:

Lic. En Ingeniería Ambiental

Presenta

José Armando García Ortiz

Directores

Dr. Randy Howard Adams Schroeder

Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez

Villahermosa, Tabasco. Abril, 2022

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Tratamiento In-Situ Por Desorción Alcalina Más Enmienda Orgánica En Suelo Hidrofóbico Contaminado Con Hidrocarburo En Bemidji, Minnesota

Por José Armando García Ortiz

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

CANTIDAD DE PALABRAS 14634
HORA DE ENTREGA 27-JUN-2025 09:11A. M.
NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO 116952362

Tratamiento In-Situ Por Desorción Alcalina Más Enmienda Orgánica En Suelo Hidrofóbico Contaminado Con Hidrocarburo En Bemidji, Minnesota

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%
ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	es.slideshare.net Internet	79 palabras — 1%
2	www.researchgate.net Internet	74 palabras — 1%
3	www.accefyn.org.co Internet	65 palabras — 1%
4	pt.scribd.com Internet	59 palabras — < 1%
5	investigacion.unirioja.es Internet	56 palabras — < 1%
6	docplayer.es Internet	50 palabras — < 1%
7	nanopdf.com Internet	45 palabras — < 1%
8	eprints.uanl.mx Internet	37 palabras — < 1%
9	www.coursehero.com Internet	30 palabras — < 1%
10	colposdigital.colpos.mx:8080 Internet	

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

		29 palabras — < 1%
11	tesis.ipn.mx Internet	28 palabras — < 1%
12	repositorio.unan.edu.ni Internet	26 palabras — < 1%
13	www.repositorio.usac.edu.gt Internet	25 palabras — < 1%
14	ri.ujat.mx Internet	23 palabras — < 1%
15	www.scielo.org.mx Internet	22 palabras — < 1%
16	Derbal, S.. "On resin amino acid side chain attachment strategy for the head to tail synthesis of new glutamine containing gramicidin-S analogs and their antimicrobial activity", Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 20101001 Crossref	17 palabras — < 1%
17	Sequeira, Diogo André. "Avaliação de Compostos de Cu(I) Como Novos Agentes Quimioterapêuticos", Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2024 ProQuest	16 palabras — < 1%
18	erecursos.uacj.mx Internet	16 palabras — < 1%
19	softwebmaster.ru Internet	15 palabras — < 1%
20	core.ac.uk Internet	14 palabras — < 1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

21	es.scribd.com Internet	13 palabras — < 1%
22	Sara Martorell Tejedor. "Desarrollo de métodos integrados para la determinación de biomarcadores genéticos", Universitat Politecnica de Valencia, 2021 Crossref Posted Content	12 palabras — < 1%
23	assets.zyrosite.com Internet	12 palabras — < 1%
24	doczz.es Internet	12 palabras — < 1%
25	hdl.handle.net Internet	12 palabras — < 1%
26	repositorio.unal.edu.co Internet	12 palabras — < 1%
27	www.pinterest.com Internet	12 palabras — < 1%
28	www.scielo.cl Internet	12 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS	ACTIVADO	EXCLUIR FUENTES	DESACTIVADO
EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA	ACTIVADO	EXCLUIR COINCIDENCIAS	< 12 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

ABRIL 29 DE 2022

C. JOSÉ ARMANDO GARCÍA ORTIZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"TRATAMIENTO *IN-SITU* POR DESORCIÓN ALCALINA MÁS ENMIENDA ORGÁNICA EN SUELO HIDROFÓBICO CONTAMINADO CON HIDROCARBURO EN BEMIDJI, MINNESOTA",** asesorado por el Dr. Randy Howard Adams Schroeder y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, Dr. Gaspar López Ocaña y M.I.P.A. Liliana Hernández Acosta.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto fisica como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **"TRATAMIENTO *IN-SITU* POR DESORCIÓN ALCALINA MÁS ENMIENDA ORGÁNICA EN SUELO HIDROFÓBICO CONTAMINADO CON HIDROCARBURO EN BEMIDJI, MINNESOTA",** de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

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

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

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 29 de Abril de Dos Mil Veintidós.

AUTORIZO

JOSÉ ARMANDO GARCÍA ORTIZ

DEDICATORIA

Al gran motor de mi vida, quien se ha esforzado día con día por apoyarme e impulsarme cada vez que parecía imposible, por no rendirte conmigo, por creer siempre en mí. **¡GRACIAS MAMÁ ¡**

Siempre estaré agradecido por la calidad de tu amor incondicional y por el esfuerzo que hiciste al brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo personal y profesional. Por esto y más, te dedico con todo mi corazón este símbolo, pues sin ti no lo habría logrado.

A mi hermano, quien ha sido mi compañero y mi amigo de toda la vida, espero que siempre sea así. *Sin ustedes dos, nada de esto tendría sentido.*

Agradezco por haber contado con una familia donde siempre he tenido un espacio, un apoyo, un hogar. Donde siempre he encontrado las puertas abiertas cuando los necesito. **¡GRACIAS FAMILIA ORTIZ!**

Se me hizo un poco tarde, pero lo terminé. Espero que desde donde estes, puedas ver este logro que gracias a tu apoyo y al de él pude lograr. Siempre están presentes **¡ABUELOS!**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Randy Howard Adams Schroeder y la Dra. Verónica Isidra Hernández Domínguez por recibirme en el laboratorio y equipo de trabajo, donde no solo contribuyeron en mi formación como ingeniero, sino que me permitieron formar parte de un ambiente de cordialidad, compañerismo y hermandad. De ustedes me llevo muy gratos y buenos momentos durante mi estadía y formación profesional. Muchas gracias por los consejos, las asesorías y por todo el apoyo incondicional durante este proceso que sin su ayuda no se hubiera logrado. ¡Muchas gracias por su apoyo!

A la Mtra. Liliana Hernández Acosta, que sin su apoyo, orientación y enseñanzas habría sido más difícil poder culminar este trabajo. Gracias por apoyarme en cada análisis que necesitaba, por su tiempo y paciencia. Es usted una excelente persona y con gran talento para transmitir su conocimiento.

A los compadres, Dr. Francisco y Dr. Gerónimo y demás integrantes del laboratorio que me apoyaron con la investigación y volvieron más amenos los días largos en el laboratorio.

A mis jurados, la Dra. Liliana Pampillon, al Mtro. Balcázar y al Dr. Gaspar, por dedicar parte de su tiempo a la revisión de este proyecto y hacer correcciones en el mismo.

Al Ing. Emmanuel a quien el laboratorio me permitió conocer y tener un agradable compañero y amigo en quien poder contar. Volviendo los tiempos de espera de los análisis más cortos y entretenidos.

A mi más grande amiga, Lucila quien tuve la fortuna de poder encontrar al principio de esta travesía, en donde poco a poco fuimos formando una entrañable y grata amistad, gracias por brindarme buenos recuerdos de mi experiencia en la universidad, por haber formado parte de una de las etapas más bonitas de mi vida, espero y podamos compartir todavía más.

A todos aquellos amigos, familia, compañeros y maestros que formaron parte de toda mi etapa estudiantil, gracias por ser parte de este largo camino para alcanzar este objetivo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

CONTENIDO

1. RESUMEN 1
2. INTRODUCCIÓN 2
3. ANTECEDENTES 4
4. JUSTIFICACIÓN 7
5. OBJETIVOS 8
4.1 Objetivo general 8
4.2 Objetivos específicos 8
5 METODOLOGÍA 9
5.1 Área de muestreo 10
5.2 Revisión bibliográfica 11
5.3 Recepción de las muestras 11
5.4 Análisis de las unidades experiméntales 12
5.5 Caracterización de la enmienda orgánica. 13
5.5.1 Materia orgánica 13
5.5.2 Carbón orgánico soluble 14
5.5.3 Nitrógeno 14
5.6 Caracterización de las muestras: sin tratamiento, muestras con desorción alcalina y muestras con desorción alcalina más enmienda orgánica. 15
5.6.1 Humedad 15
5.6.2 Humedad crítica 16
5.6.3 Repelencia 17
5.6.4 Hidrocarburos totales de petróleo 18
5.6.5 Toxicidad 19
5.6.6 pH 20
5.6.7 Conductividad eléctrica 21
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 23
6.1 Presentación de resultados 23
6.2 Evaluación de los tratamientos desorción alcalina (AD) y desorción alcalina más enmienda orgánica (ADO) posterior a un año de tratamiento 24
6.2.1 Humedad *in situ* 24
6.2.2 Humedad crítica. 26

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

6.2.3 pH 28
6.2.4 Conductividad eléctrica posterior al tratamiento por AD 30
6.2.5 Determinación del MED10 posterior a los tratamientos. 31
6.2.6 Determinación del HTP. 34
6.2.7 Evaluación de la toxicidad por *Eisenia foetida* posterior a los tratamientos por AD y ADO. 37
6.2.8 Nitrógeno 39
6.2.9 Carbón orgánico soluble y materia orgánica 40
7 CONCLUSIÓN 44
8 RECOMENDACIONES 46
9 REFERENCIAS 47
10 ANEXOS 51
10.1.1 ANEXO A 51
10.1.2 ANEXO B 52
10.1.3 ANEXO C 53
10.1.4 ANEXO D 54

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Índice de figuras

Figura 1. Secuencia de la metodología seguida durante el desarrollo del proyecto. 9
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia en ArcMap 10.8 (2021) 10
Figura 3. Diseño e identificación de muestras..... 11
Figura 4. Determinación de materia orgánica 13
Figura 5. Determinación de Nitrógeno..... 14
Figura 6. Medición del porcentaje de humedad..... 15
Figura 7. Medición de la humedad crítica. 16
Figura 8. Medición de la repelencia 17
Figura 9. Determinación de HTP. 18
Figura 10. Bioensayo de toxicidad. 19
Figura 11. Medición del pH..... 20
Figura 12. Determinación de la CE. 22
Figura 13. Comparación del % HIS (humedad in situ), respecto a los tratamientos. 25
Figura 14. Comparación de la humedad crítica posterior a los tratamientos. 26
Figura 15. Relación entre la humedad in situ y la humedad crítica posterior a los tratamientos. 28
Figura 16. Comparación del pH respecto al tratamiento por AD y ADO 30
Figura 17. Conductividad eléctrica posterior a los tratamientos por AD y ADO. 31
Figura 18. Determinación del MED10 posterior al tratamiento por AD. 34
Figura 19. Cuantificación de HTP posterior a los tratamientos. 36
Figura 20. Porcentaje de nitrógeno total..... 40
Figura 21. Relación carbón orgánico soluble y materia orgánica 41
Figura 22. Porcentaje de materia orgánica respecto a los tratamientos por ADO 42
Figura 23. Comparación de la concentración de HTP respecto a los puntos de referencia.... 52
Figura 24. Comparación del MED10 respecto a los puntos de referencia..... 53
Figura 25. Comparación de la relación HIS/HC de las muestras tratadas con respecto a los puntos de referencia sin tratamiento. 54

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Índice de cuadros

Cuadro 1. Cantidad de agua utilizada en las celdas tratadas con NaOH. 6

Cuadro 2. Análisis de las unidades, para su caracterización. 12

Cuadro 3. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH con referencia de la (NOM- 021-RECNAT-2000). 21

Cuadro 4. Criterios para la interpretación de la conductividad eléctrica. (NOM-021-SEMARNAT-2000). 22

Cuadro 5. Caracterización de las muestras sin tratamiento por parte de Cerecedo en 2014. . 23

Cuadro 6. Composición de la textura del suelo caracterizado por Cerecedo 2014. 24

Cuadro 7. Caracterización del MED respecto a los tratamientos 32

Cuadro 8. Concentración de HTP respecto a los tratamientos 35

Cuadro 9. Comparación de la toxicidad respecto a los tratamientos. 38

Cuadro 10. Cuadro de clasificación del porcentaje del nitrógeno total 40

Cuadro 11. Cuadro de interpretación del porcentaje de materia orgánica de la NOM-021-RECNAT-2000. 43

Cuadro 12. Caracterización de los puntos de referencia. 51

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

1. RESUMEN

El presente estudio está conformado por la evaluación de un suelo contaminado con hidrocarburos en 1979 en las localidades de Bemidji, Minnesota, donde se llevó a cabo la evaluación de la tecnología desorción alcalina a través de un proceso secuencial. Inicialmente en septiembre del 2014 se llevó a cabo la aplicación de la desorción alcalina con una concentración 1 N de NaOH en las celdas de tratamiento, posteriormente en 2015 se realizó el muestreo de las celdas tratadas con desorción alcalina y se le adiciono 4 % de enmienda orgánica (p/p) en base seca a cada una de las celdas de tratamiento, finalmente en 2016 se realizó la colecta de las muestras tratadas por desorción alcalina más enmienda orgánica con un año de tratamiento. Para medir la eficiencia de los tratamientos se realizó la determinación de los parámetros de humedad, humedad crítica, MED, HTP, pH, CE y toxicidad, de las muestras AD2015(desorción alcalina 2015) y ADO2016 (desorción alcalina más enmienda orgánica 2016); también se llevaron a cabo análisis de COS, MO, y nitrógeno para las muestras ADO2016, debido a que a estas se les había adicionado enmienda orgánica y se quería conocer su comportamiento con un año de aplicación. Con la finalidad de poder dimensionar la evolución de los tratamientos se hizo referencia de los datos de estudio de la caracterización inicial sin tratamiento por parte de Cerecedo en 2014. El análisis de humedad crítica mostró una mejoría respecto al tratamiento por desorción alcalina, como resultado se obtuvo que las muestras GS3-AD y GS-4AD disminuyeran en un 33 y 54 % los niveles de humedad crítica respecto a los valores iniciales de las muestras sin tratamiento. Las muestras GS-3ADO2016 y GS-4ADO2016 presentaron una reducción en los niveles de humedad crítica obtenidos anteriormente mediante el tratamiento por AD2015 al punto que la muestra GS-4ADO2016 dejó de ser repelente. Así mismo, se puede observar como la relación entre la HIS/HC presenta un incremento en su relación respecto al tratamiento final mediante ADO. Las muestras sin tratamiento mostraron una relación <1 por lo que las probabilidades de que en sitio estas áreas presenten problemas hidrofóbicos es alta, mientras que las muestras AD2015 presentaron una relación >1, las muestras ADO2016 mantuvieron este mismo comportamiento, inclusive mostraron un incremento entre la relación HIS/HC permitiendo observar que la adición de la enmienda orgánica contribuye notablemente al aumento de la retención de humedad *in situ* el cual podría superar la humedad crítica del suelo para poder vencer los impactos de la repelencia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México

2. INTRODUCCIÓN

En 1859 Edwin L. Drake abrió el camino hacia el progreso energético perforando el primer pozo petrolero de los Estados Unidos, el cual alcanzó una profundidad de 21 metros (Baii, M., Guillén, A., & Abreu, J. 2017). Desde entonces las aplicaciones del petróleo fueron creciendo de manera exponencial abriendo un mercado para este producto.

Hoy en día, el petróleo y sus derivados se pueden encontrar en diversos procesos como; materia prima para la industria de la transformación, automóviles, televisores, ropa, cosméticos, perfumes, detergentes, etc. Lo cual ha producido una necesidad de recursos energéticos en el mundo que ha ido aumentando por el crecimiento poblacional, el desarrollo de la industria y el transporte. Esta demanda desmedida ha originado que actividades como; la extracción de crudo, fallas operacionales, falta de mantenimiento y extracción ilegal a los oleoductos, sean causantes de diversos problemas ambientales ocasionando el deterioro y una lenta autodepuración de los ecosistemas, interfiriendo en la dinámica existente y de los servicios ambientales que este otorga. De acuerdo con Vidal, G. (2008), el uso de combustibles fósiles ha ocasionado afectaciones en gran medida a la flora y fauna de nuestro ecosistema; por lo que desarrollar un manejo integral para sitios afectados por derrames de HC (hidrocarburos) se ha vuelto indispensable.

Según SEMARNAT (2015) tan solo en México entre 2008 y 2015 se identificaron 4 078 sitios contaminados por emergencias ambientales, de este total, Pemex tuvo responsabilidad en 2 743 de ellos. Esto deja en evidencia la susceptibilidad de los suelos y de la importancia que adquiere la innovación en procesos y tecnologías sustentables que difieran de lo convencional, permitan el cuidado y tratamiento de los sitios afectados por derrames de hidrocarburos que sufren modificación en los aspectos de su naturaleza, por ejemplo; problemas de toxicidad, infertilidad, hidrofobicidad, compactación o erosión.

De acuerdo con Saval, B. S. (1995) el problema de los suelos contaminados con hidrocarburos consiste que hace algunos años la sociedad no concientizaba sobre la dificultad y el costo que representa la remediación de los suelos contaminados. En la actualidad existen tecnologías biológicas, térmicas y fisicoquímicas que brindan una alternativa para la

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

remediación y recuperación de las propiedades del suelo, pero las ventajas y desventajas que ofrece cada una son variada.

Sin duda alguna, la selección y aplicación de una tecnología de remediación es un proceso que implica la evaluación a fondo de cada una de las variables que influyen directa e indirectamente en la restauración de un sitio. Hoy en día y gracias a los avances en la investigación, se tiene conocimiento de una amplia gama de técnicas que pueden ser funcionales y exitosas para remediar los suelos. Dentro de estas tecnologías, se encuentra la desorción alcalina, la cual es una técnica basada en un lavado de suelos con un reactivo que induce al desprendimiento de los hidrocarburos de las partículas del suelo. En este proyecto se evaluó el efecto de la desorción alcalina más la adición de una enmienda orgánica para tratar un suelo repelente al agua, que ha sido contaminado por un derrame de hidrocarburos. Como modelo de estudio, se analizaron las unidades experimentales del área contaminada y de la enmienda orgánica utilizada, se determinaron las características del suelo contaminado posterior a un año de aplicación de la desorción alcalina y se evaluó nuevamente al año siguiente de haber aplicado la enmienda orgánica, se analizó la concentración de hidrocarburos y el grado de repelencia mediante la prueba de HTP (Hidrocarburos totales presentes) y MED10 (Molarity etanol droplet)), así como una evaluación de la humedad *in situ* vs. la humedad crítica, a la que se empieza a manifestar la repelencia.

.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

3. ANTECEDENTES

El 20 de agosto de 1979 un siniestro suscitado en las localidades de Bemidji, Minnesota originó la necesidad de buscar alternativas para la recuperación del sitio, cuando una tubería que transportaba petróleo crudo estalló, derramando alrededor de 1.7 millones de litros de petróleo crudo sobre la superficie terrestre de un terreno de aproximadamente 7,500 m2 en Bemidji, Minnesota (Essaid et al. 2011). Posteriormente se intemperizó, debido a una quema inducida para reducir el volumen de aceite, aunque inicialmente se removió cerca del 75% del crudo en la actualidad aún se pueden apreciar signos de contaminación de aceites y de hidrofobicidad en algunas áreas impactadas, ocasionada por la adherencia de los aceites residuales a las partículas del suelo. Estudios relacionados han encontrado una correlación ante la presencia de problemas de repelencia en suelos afectados por derrames, con el sometimiento de incendios o sequias por largos periodos.

Es por ello que en 1983 se comenzaron a llevar a cabo investigaciones a través del apoyo del Programa de Hidrología de Sustancia Tóxicas del US Geological Survey (USGS). De acuerdo con Delin, et al. (1998), esto permitiría brindar una oportunidad para comprender los procesos físicos, químicos y biológicos que controlan la migración y el destino de los contaminantes de hidrocarburos en el subsuelo.

En la actualidad diversos estudios se han realizado sobre el tema de la hidrofobicidad en suelos a nivel internacional, lo que representa un desafío para encontrar una combinación de técnicas para la restauración y remediación de un suelo con problemas de repelencia provocados por la quema, la acumulación de materia orgánica o por hidrocarburos.

Actualmente extensas áreas de suelos contaminados con petróleo llegan a permanecer largos periodos de tiempo sin tratamiento permitiendo que el hidrocarburo se intemperice sobre la superficie (Ávila Acosta, 2014).

Adams, et al. (2008) realizaron un estudio en suelos de dos sitios con presencia de repelencia causada por la contaminación de hidrocarburos. El primer sitio ubicado a un lado de la batería Cinco presidentes No1 fue descrito por Zavala Cruz et al. (2005) como un Anthrosol distri-hortrico, del cual se recolectaron suelos de fondo (sin antecedentes de contaminación),

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

suelo contaminado y suelo biorremediado. Gracias a una ligera lluvia se pudieron observar señales de hidrofobicidad en el campo a pesar de no mostrar olor, color o consistencia por hidrocarburo. La repelencia al agua determinada por el método (Molaridad de la gota de etanol) MED permitió observar los siguientes valores, suelo control (0), suelo contaminado (1.7) y el biorremediado (4.6). El segundo sitio corresponde a un área pantanosa baja, cerca de la planta de procesamiento de gas en la Venta, Tabasco, que ha sido descrito por Rivera Cruz y Trujillo Nárcia (2004), como un Gleysol antarquico de naturaleza arcillosa. El cual se encuentra expuesto a fugas crónicas de petróleo crudo. Sin embargo, no se observó presencia de repelencia al agua en el campo y la vegetación existente correspondía de espadaños y pastos adaptados a las condiciones pantanosas. Mediante las pruebas de laboratorio se determinó que la repelencia al agua estaba relacionada asintóticamente con la concentración de hidrocarburos además de relacionarse logarítmicamente (R=0.957) con la persistencia de la repelencia al agua. Como conclusión, se determinó que la persistencia al agua fue mucho mayor en el suelo arenoso con un (Tiempo de penetración de una gota de agua) WDPT >6 aproximadamente en comparación al suelo arcilloso, inclusive si este fue remediado a niveles de (Hidrocarburos totales de petróleo) HTP (<1%).

La caracterización del suelo de Bemidji fue realizada por parte de Cerecedo en 2014 y con la aplicación de la técnica “desorción alcalina” demostró una eficiencia en las muestras (GS-1, GS-5, GS-6 y GS-7 con un WDPT <60s), disminuyendo su hidrofobicidad y logrando que el suelo absorbiera agua, aunque en un tiempo todavía alto. Mientras que las cinco muestras restantes no presentaron la misma mejoría dado que mostraban un (MED>6.32) clasificadas como severamente repelentes de acuerdo a la escala propuesta por King (1981).

Alejandro, (2015) realizó la aplicación de la desorción alcalina (66 ml de NaOH 1N por 200 g de suelo) a cinco muestras (GS-2, GS-3, GS-4, GS-8 y GS-9) colectadas en el 2012. El tratamiento no solo redujo el grado de repelencia, también causo una disminución en los HTP del 75%. Sin embargo, Alejandro señala que la adicción excesiva de NaOH, causó un aumentó en el pH >9, lo cual deja al suelo como fuertemente alcalino.

Contreras (2017) evaluó dos tratamientos (desorción alcalina y desorción alcalina más cachaza de caña) a escala laboratorio basándose en las recomendaciones de Cerecedo y Adams (2014), Alejandro (2015). Este tratamiento agrega 100 ml de solución 0.2N de NaOH

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

(tratamiento 1) y 100 ml de solución más cachaza de caña (tratamiento 2), los resultados mostraron una remoción de 67.90% de los hidrocarburos totales de petróleo y una reducción de la repelencia reportando un suelo ligeramente repelente (WDPT<40s).

Tratamiento en el sitio

La aplicación de la tecnología de desorción alcalina se realizó el 13 de agosto del 2014 en campo, colocando el suelo en cinco celdas (GS-1, GS-3, GS-4, GS-6 y GS-7) elaboradas con dimensiones de 40x40x10 cm, donde se aplicó al suelo contaminado con hidrocarburos intemperizados una solución de NaOH con una concentración 1N. Se realizó mezclado manual, con la finalidad de homogeneizar la solución en el suelo tratado. Posterior a la aplicación de NaOH, se realizó un lavado con agua, para ello se utilizaron cantidades variables de agua en cada una de las celdas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Cantidad de agua utilizada en las celdas tratadas con NaOH.

Celda	ENJUAGUE CON AGUA (L)
GS-1	9
GS-3	4
GS-4	3.5
GS-6	1
GS-7	8

El 2 de septiembre del 2015 se llevó a cabo una colecta de muestras de suelo, de las cinco celdas tratadas por desorción alcalina después de un año de tratamiento *in situ* bajo condiciones de intemperie. Posteriormente se adicionó a cada celda 4% de enmienda orgánica (p/p) en base seca, obtenida del composteo de árboles y arbustos con un año de maduración, la cual se mezcló de manera manual para homogeneizar el suelo tratado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

4. JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia del creciente desarrollo y expansión de las ciudades, se ha originado que le restemos importancia a los servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo que forma parte de nuestro sistema terrestre, brindando el soporte y suministro de nutrimentos a las plantas. Lo anterior es importante porque el suelo y el agua son la base fundamental para la producción de alimentos (Torres et al., 2003). Estudios anteriores han planteado la importancia del suelo y la vulnerabilidad de este ante eventos que ocasionan una disminución en la fertilidad del suelo ocasionada por un incremento en la hidrofobicidad. Se ha hallado en todos los continentes, excepto en el antártico; bajo climas estacionales tropicales o subárticos; bajo uso de agricultura intensiva o bosques perennifolios; en suelos arcillosos o suelos arenosos; en suelos muy secos o suelos muy húmedos (Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000; Doerr et al., 2000; Dekker y Ritsema, 1996a).

La repelencia es la incapacidad de un suelo en cuanto a la absorción del agua dicho de otra manera es una disminución en su permeabilidad, existen varias técnicas para su remediación, pero es indispensable tomar en cuenta varios factores, sobre todo que los tratamientos deben ser factibles, económica y ambientalmente. Esto es una encomienda cada vez que pensamos en diseñar estrategias de recuperación para un sitio contaminado.

El problema de la aplicación de las tecnologías radica muchas veces en las características edafológicas y geográficas de la región, es por ello que estos suelos requieren de un tratamiento estructurado de acuerdo a sus parámetros físicos, químicos y biológicos.

En este proyecto se plantea una estrategia basada en la aplicación de desorción alcalina a un suelo contaminado con hidrocarburo, qué fue desarrollada en el Laboratorio de Remediación de la UJAT más el adicionamiento de una enmienda orgánica, para comprobar la factibilidad de la nueva tecnología de remediación, incorporando suficiente materia orgánica capaz de funcionar como amortiguador y fuente de carbono para el desarrollo de microorganismos. La importancia de esto radica en identificar un método eficaz con resultados enfocados a la recuperación de un sitio impactado con hidrocarburo intemperizado y recalcitrante con un clima continental y devolver su capacidad de uso.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de la desorción alcalina más una enmienda orgánica, para tratar suelo contaminado con petróleo crudo e hidrofóbico.

4.2 Objetivos específicos

- Recopilar las características del área contaminada (humedad crítica, repelencia, pH, HTP, conductividad eléctrica y toxicidad).

- Determinar las características del suelo contaminado respecto a un año de aplicación de la desorción alcalina (humedad crítica, repelencia, pH, HTP, conductividad eléctrica y toxicidad).

- Evaluar la tecnología desorción alcalina después de un año de aplicación de la enmienda orgánica, mediante la medición de los parámetros; humedad crítica, repelencia, pH, HTP, conductividad eléctrica, toxicidad, materia orgánica, carbón orgánico soluble y nitrógeno para la determinación de su eficiencia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5 METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos propuestos por este proyecto se siguió las etapas mostradas en la Figura 1 que se encuentra a continuación.

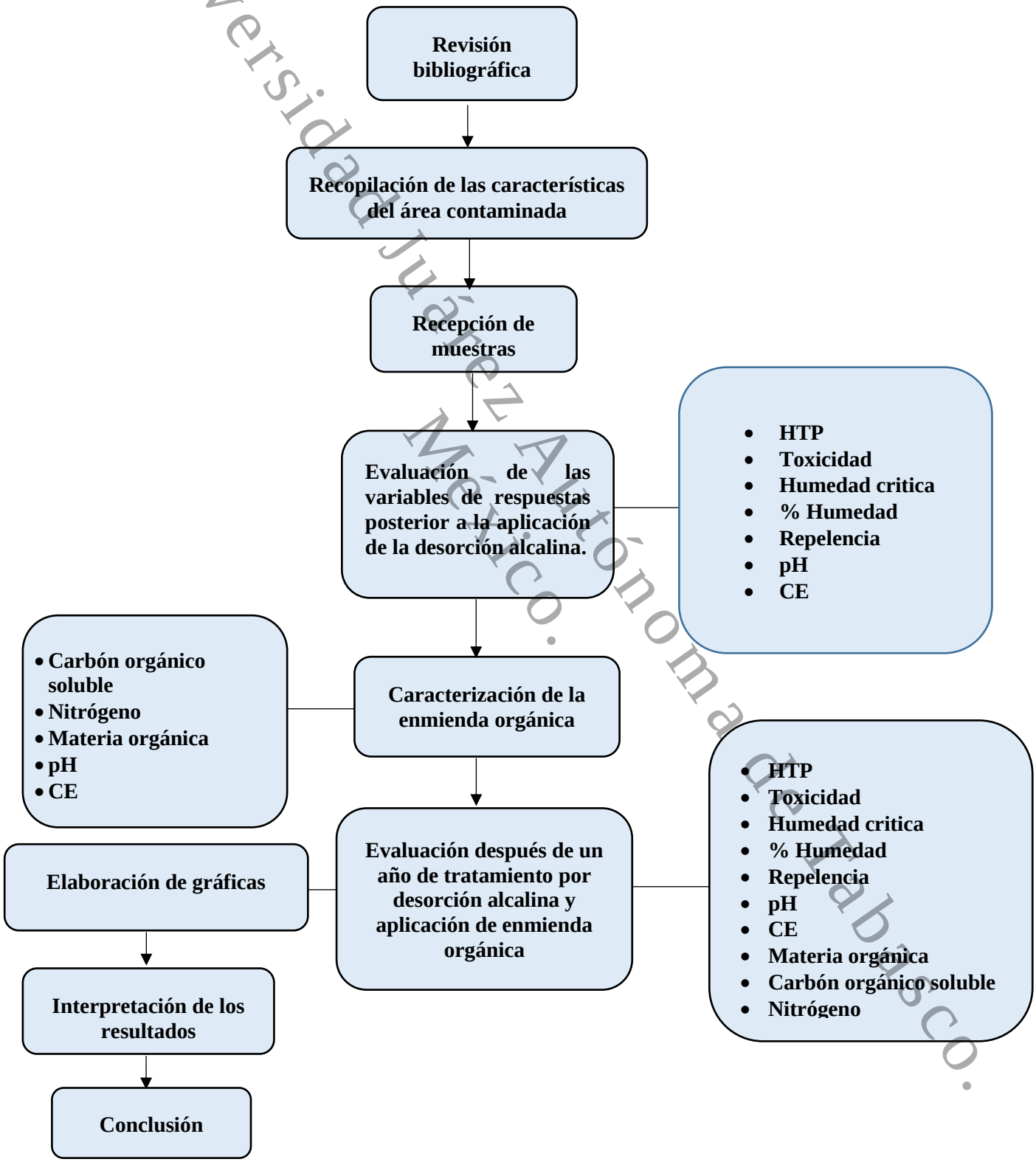

Figura 1. Secuencia de la metodología seguida durante el desarrollo del proyecto.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.1 Área de muestreo

El sitio de donde se dispone las muestras experimentales se encuentra ubicado en el condado de Beltrami, Bemidji, Minnesota E.U., en las coordenadas 47.57289 N -95.09177 W (Grados decimales). En la Figura 2 se puede observar la imagen satelital del lugar donde se llevó a cabo el muestreo.

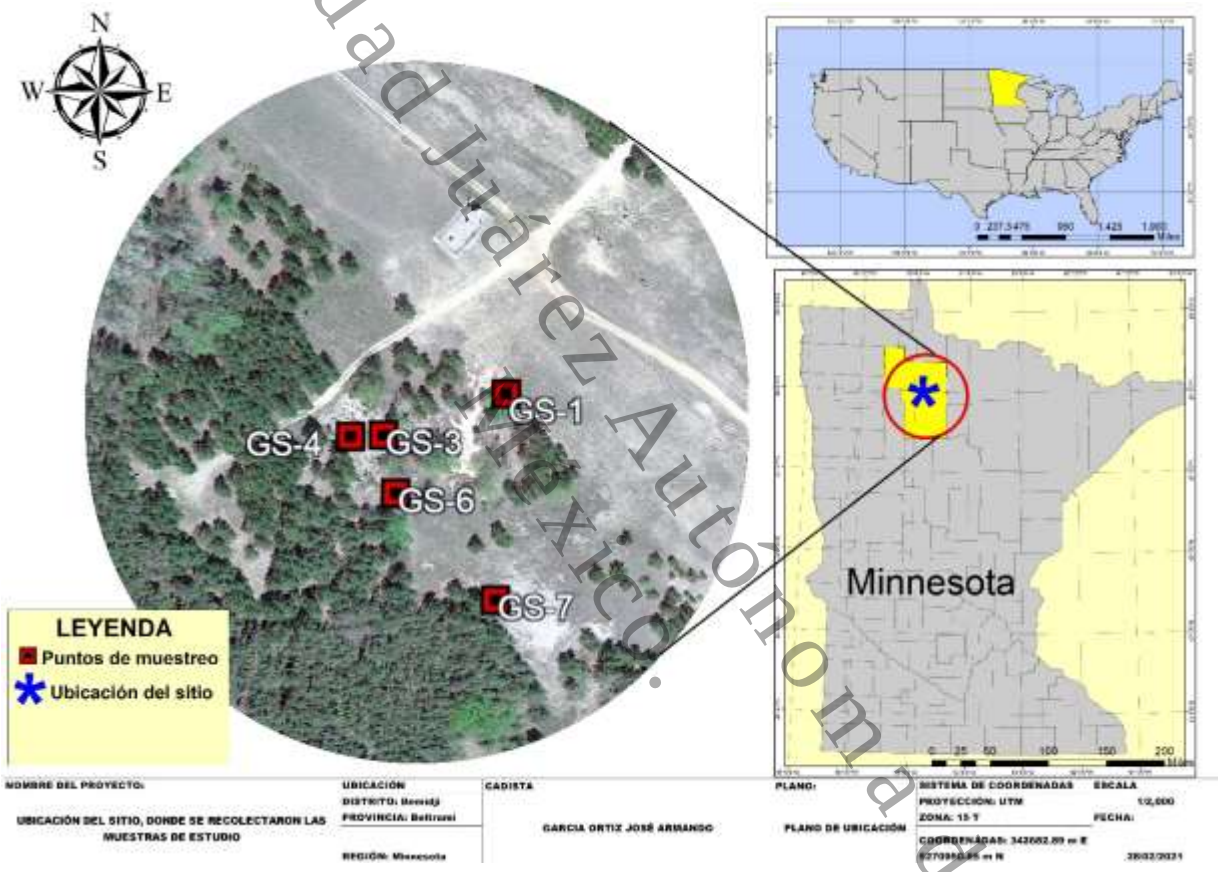

Figura 2. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia en ArcMap 10.8 (2021)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.2 Revisión bibliográfica

Se inicio con la búsqueda de información de los estudios realizados en el sitio afectado, para conocer los avances y el estado del sistema. Con base en los resultados de los tratamientos y proyectos previamente realizados se identificaron los cambios más representativos para definir las acciones en cuanto a la metodología del proyecto.

5.3 Recepción de las muestras

Antes de ejecutar los análisis, se registraron y organizaron las muestras, para asegurar la correcta identificación. De igual forma se midió el porcentaje de humedad inicial para tener referencias de cada una de las muestras.

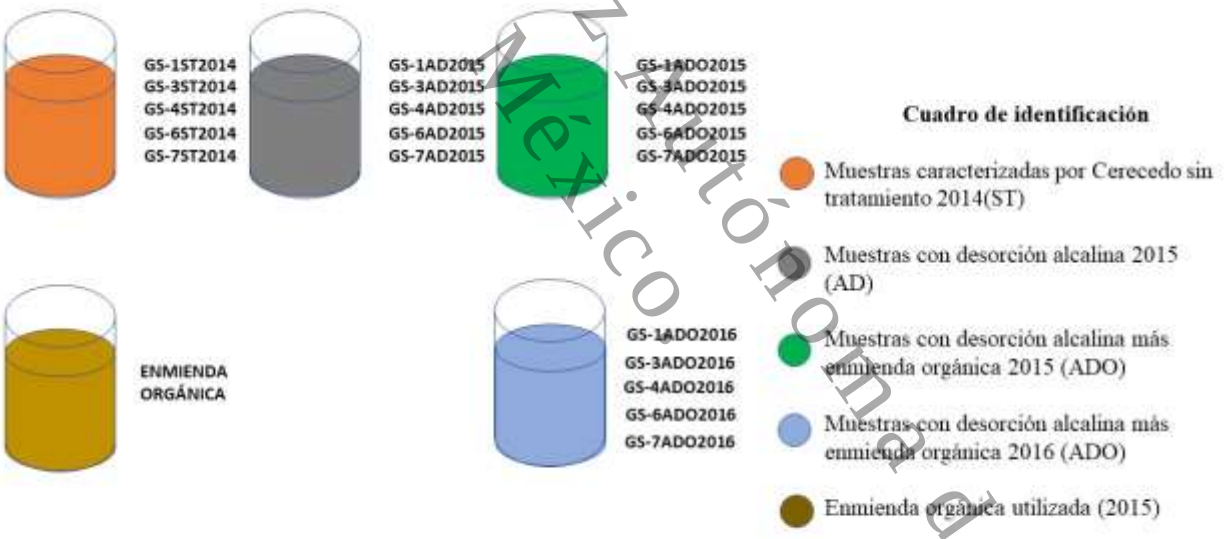

Figura 3. Diseño e identificación de muestras.

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo durante tres años consecutivos iniciando en agosto del 2014. Las celdas de experimentación fueron tratadas por desorción alcalina con la finalidad de inducir el desprendimiento del hidrocarburo adherido a las partículas del suelo, posteriormente en septiembre del 2015 se recolectaron las muestras y se adicionó enmienda orgánica a las celdas de tratamiento, finalmente en septiembre del 2016 se recolectaron las

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

muestras de las celdas de tratamiento, las cuales se etiquetaron y embazaron para su estudio en el laboratorio (Figura 3).

5.4 Análisis de las unidades experiméntales

Cuadro 2. Análisis de las unidades, para su caracterización.

ANÁLISIS	GS-ST	GS-AD	GS-ADO	ENMIENDA	P.DE REFERENCIA
Humedad	+	+	+	+	+
Humedad crítica	+	+	+		+
MED 10	+	+	+		+
Conductividad eléctrica	+	+	+	+	+
pH	+	+	+	+	+
Hidrocarburos totales	+	+	+		+
Toxicidad	+	+	+		+
Nitrógeno			+	+	
Carbón orgánico soluble			+	+	
Materia orgánica			+	+	

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.5 Caracterización de la enmienda orgánica.

Se realizaron los siguientes análisis para la caracterización de las muestras ADO (procedentes del tratamiento con desorción alcalina más adición de enmienda orgánica) y para la enmienda orgánica, la cual fue utilizada como parte del tren de tratamiento en las muestras tratadas un año atrás con desorción alcalina.

5.5.1 Materia orgánica

El contenido de MO del suelo, es considerado uno de los indicadores más importantes para poder determinar la calidad del suelo, por su efecto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas. (Eyherabide, et al., 2014). La determinación de materia orgánica por calcinación se basa en la medición de la pérdida de peso de la muestra posterior al sometimiento de una combustión seca del material orgánico, que de acuerdo a lo mencionado por Dean (1974) las pérdidas sometidas a una ignición de 550 °C proveen una medición del contenido del material orgánico más preciso en comparación a otros métodos.

Inicialmente se identificaron los crisoles y se colocaron en un horno durante una hora a 105 °C para eliminar el contenido de humedad existente, se retiraron del horno y se colocaron en un desecador durante 30 minutos, posteriormente se obtuvieron los pesos constantes de los crisoles sin muestra y se registraron los pesos, seguidamente se agregaron 5 g de muestra seca en cada crisol y se dejaron durante 2 horas en una mufla a 550 °C, después se introdujeron nuevamente a 105 °C dentro del horno, pasado una hora se retiraron y se colocaron en un desecador por 30 minutos, se pesaron los crisoles con muestras ya calcinadas y se realizó el cálculo por diferencia de peso para conocer el contenido de materia orgánica.

Figura 4. Determinación de materia orgánica

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.5.2 Carbón orgánico soluble

Se evaluó el carbón orgánico soluble (COS) utilizando Carbonato Acido de Sodio (NaHCO3) 0.5 M, se pesaron 2.5 g de muestra previamente molida y tamizada en un frasco de centrifuga y se agregó 50 ml de solución NaCO3 0.5 M de a pH de 8.5, se dejó agitar a 180 rpm por 30 minutos, se utilizó papel Whatman No. 42 para filtrar la muestra y se prepararon alícuotas de 5 ml, las cuales se diluyeron con agua desionizada en un matraz aforado de 25 ml, finalmente se realizó la medición con ayuda de un espectrofotómetro (Genesys 10S UV-Vis) a 260 nm.

El COS se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, al aportar elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente deficitario (Martínez et al., 2008).

5.5.3 Nitrógeno

Se peso 1 g de cada muestra en frascos de centrifuga, se agregó 20 ml de agua desionizada, posteriormente se agito durante 1 minuto en el Vortex y se dejó centrifugar durante 10 minutos a 2000 rpm, se utilizó papel filtro No. 42 para realizar el filtrado de las muestras, luego se vertió dentro de un matraz aforado de 100 ml, se aforo con agua desionizada, se tomaron 25 ml y se depositaron en una celda del equipo la cual se designó como el blanco. Se vertió otros 25 ml de muestra en un vaso de precipitado de 50 ml, se agregaron tres gotas de dispersante, tres de estabilizador mineral y 1 ml de reactivo Nessler, se agitó y mientras transcurría el minuto (tiempo de reacción) se llevó a cabo la lectura del blanco en un espectrofotómetro DR-2800 a 440 nm, se ajustó a cero y posteriormente se realizó la lectura de absorbancia de la muestra con reactivo.

Espectrofotómetro DR-2800.

Filtrado de muestras.

Figura 5. Determinación de Nitrógeno.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.6 Caracterización de las muestras: sin tratamiento, muestras con desorción alcalina y muestras con desorción alcalina más enmienda orgánica.

Los siguientes análisis fueron realizados en cada una de las muestras ST (muestras sin tratamiento) al igual que en las muestras AD (muestras con desorción alcalina) y en las muestras ADO (muestras con desorción alcalina más enmienda orgánica).

5.6.1 Humedad

La determinación del porcentaje de humedad contenido en las muestras de suelo se realizó por el método gravimétrico, mediante una termobalanza MB35 Ohaus, la cual mide el porcentaje de humedad de la muestra requerida, cumpliendo de esta manera con lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000. El procedimiento para el análisis consistió en encender la termobalanza con 30 minutos de anticipación como mínimo, se dispuso de una pequeña parte de la muestra de suelo con la ayuda de una espátula de aluminio corroborando que esta no posea raíces o materia orgánica que pueda influir en el porcentaje de humedad, misma que se colocó en una charola de aluminio dentro de la termobalanza previamente tarada, posteriormente se presionó el botón de inicio y se esperó que transcurriera los diez minutos reglamentarios que requiere el equipo para realizar el análisis. Este proceso se repitió para el análisis de cada una de las muestras obtenidas del 2014, 2015 y 2016 en Bemidji, Minnesota.

Figura 6. Medición del porcentaje de humedad.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.6.2 Humedad crítica

El análisis de humedad crítica se realizó en las muestras ST, AD y ADO de ambos años, exceptuando las muestras (GS-4ADO 2016) dado que está ya no presentaba indicios de repelencia y por tal razón ya no requería el análisis de este parámetro. Se pesaron 150g de muestras que se colocaron sobre un refractario de vidrio, misma que se humedecieron hasta que el tiempo de penetración fuera menor a un segundo agregando agua en forma de roció con la ayuda de un atomizador, posteriormente se mido el porcentaje de humedad y se mezcló hasta homogeneizar completamente las muestras de suelo, previniendo la formación de grumos para evitar variabilidad en las lecturas. Se dejó reposar la muestra durante 15 minutos considerando que los suelos arenosos tienden a perder la humedad rápidamente, transcurrido este tiempo se homogeneizo nuevamente la muestra, se midió nuevamente el porcentaje de humedad y se calculó el WDPT. Este procedimiento se repitió hasta obtener más de cinco lecturas de cada una de las muestras de interés.

Figura 7. Medición de la humedad crítica.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

5.6.3 Repelencia

La evaluación de este parámetro se determinó mediante dos métodos, el primero de ellos se realizó usando la metodología de King (1981) modificado por (Adams et al. 2008) del MED (Molarity etanol droplet) para medir el grado de severidad, el cual consiste en determinar la concentración (molaridad o porcentaje) de aquella solución de etanol que penetra en el suelo en 10 segundos o menos, mientras que la persistencia de la repelencia se determinó a través del WDPT (Water Droplet Penetration Time) que se basa en medir el tiempo que tarda en penetrar completamente una gota de agua destilada que se coloca en la superficie del suelo.

Figura 8. Medición de la repelencia

Previo a la medición del MED, las muestras de estudio se homogeneizaron y tamizaron en una malla menor de 2 mm, posteriormente se utilizaron cajas Petri las cuales se rellenaron con la muestra de suelo hasta el borde del recipiente, tratando que esta quedara lo más uniforme posible. Se prepararon múltiples soluciones de etanol con diferentes molaridades y se midieron los tiempos de penetración de cada gota de solución (Figura 8), realizando así cinco lecturas de cinco molaridades diferentes. Una vez adquirido los datos, se promediaron los tiempos y se realizaron las gráficas considerando los tiempos de penetración con respecto a la molaridad de la solución de etanol obteniendo así el MED10 Y WDPT. Este estudio se realizó en cada una de las muestras de Bemidji, que fueron tratadas por desorción alcalina y con desorción alcalina más enmienda orgánica, para así poder observar los cambios que sufrieron posterior a los tratamientos y comparar su comportamiento.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.6.4 Hidrocarburos totales de petróleo

Este análisis se llevó a cabo mediante el método recomendado por la EPA (418.1) el cual emplea el tetracloroetileno (TCE) como solvente para separar los hidrocarburos totales de petróleo que se encuentran adheridos a las partículas del suelo. Para su preparación se requirió que las muestras de suelo se tamizaran en una malla de 2 mm, posteriormente se pesó 2 g de suelo de cada muestra, los cuales se depositaron dentro de matraces aforados de 100 ml y se agregó 25 ml de Tetracloroetileno, finalmente se dejó reposar durante 48 horas dentro de la campana de extracción. Una vez transcurridas las 48 horas se procedió con el filtrado del extracto, se prepararon los vasos de precipitado de 50 ml y se colocó papel Whatman del No 40 en forma de cono sobre ellos, luego se dejó filtrar completamente dentro de la campana de extracción y se prepararon alícuotas de la solución 1:10, para realizar las lecturas con el quipo Infracal, el cual había sido encendido 30 minutos antes y calibrado con base en el solvente limpio.

Figura 9. Determinación de HTP.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Para su lectura se utilizó un equipo TOG/TPH Analyzer de la marca infracal, el cual mide por espectrofotometría infrarroja a 2,950 cm-1. Posteriormente las lecturas se contrastaron con una curva de calibración de hidrocarburo pesado, relativo al tipo de hidrocarburo o crudo analizado. La importancia de la cuantificación de los HTP en el suelo consiste en poder determinar la concentración presente en las muestras para establecer una posible relación entre la concentración de los hidrocarburos en la muestra, la severidad, persistencia y humedad crítica (Cerecedo López, R.A. 2014).

5.6.5 Toxicidad

Se realizaron bioensayos de contacto directo con la lombriz *Eisenia foetida* perteneciente a la familia Lumbricidae, las cuales han sido reconocidas ampliamente, para la realización de pruebas de evaluación de toxicidad de suelos contaminados (Dorn et al., 1998; Wilson et al., 2002). Para este análisis se utilizó el método modificado por Domínguez-Rodríguez et al., (2020) del protocolo 207 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) que consiste en la preparación de 5 g (base pesos seco) de suelo, formando una capa delgada que se humedece y se coloca directamente en el fondo del recipiente. Posteriormente se colocaron las lombrices de tierra las cuales se monitorearon a las 24 h para evaluación de respuesta de estímulos y a las 48 h para determinar la tasa de mortalidad y peso.

Figura 10. Bioensayo de toxicidad.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

5.6.6 pH

Para el cálculo del potencial de hidrógeno se utilizó un equipo multiparámetro Modelo HI 98195 en una suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo/agua 1:2.5, el cual se basa en la determinación de la actividad del ion H+ que nos permite determinar el grado de alcalinidad o acidez de las muestras del suelo.

Se comenzó pesando 10 g de suelo previamente molido y tamizado con un tamiz de diámetro menor a 2 mm en Matraces Erlenmeyer de 250 ml, se adiciono 25 ml de agua destilada, se colocaron durante una hora en un mezclador orbital a 120 rpm y se dejó reposar durante 30 min después de ser retirados del mezclador. Finalmente se realizó la lectura del pH en cada una de las muestras con el multiparámetro previamente calibrado.

Figura 11. Medición del pH.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Cuadro 3. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH con referencia de la (NOM- 021-RECNAT-2000).

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	>8.6

5.6.7 Conductividad eléctrica

El incremento de salinidad en el suelo puede ocasionar afectaciones en el rendimiento de los cultivos asociados a la CE presente en el suelo, dado que esta se encuentra vinculada a la concentración y composición de las sales disueltas. Para conocer la capacidad de CE de las muestras del suelo, se pesaron 10 g de suelo de cada muestra en un Matraz Erlenmeyer al cual se le agrego 50 ml de agua desionizada, posteriormente se colocó durante una hora a 180 rpm en un multiagitador, luego se dejó decantar por 10 minutos y finalmente se empleó un multiparámetro HANNA Modelo HI 98195 previamente calibrado para realizar las lecturas de las muestras preparadas de suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo/agua, la cual permitió conocer la capacidad del suelo (concentración de sales) en solución para transportar una corriente eléctrica. El grado de salinidad se determinó con la ayuda del cuadro 2 de acuerdo a la NOM-021- RECNAT-2000.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Decantación de la muestra

Medición de la CE.

Figura 12. Determinación de la CE.

Cuadro 4. Criterios para la interpretación de la conductividad eléctrica. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

CE ds m^{-1} a 25° C	**Efectos**
<1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Presentación de resultados

Los resultados de este trabajo, se encuentran conformado por 2 momentos, correspondientes a la siguiente cronología; 1) caracterización posterior a la aplicación de la desorción alcalina en 2015 y 2) caracterización después de aplicar la enmienda orgánica en 2016. La secuencia de actividades en campo fue: 2014 – muestreo inicial y aplicación de la desorción alcalina; 2015 – muestreo (del efecto de la desorción alcalina) y aplicación de la enmienda orgánica; 2016 – muestreo del efecto de la enmienda orgánica. Todas las actividades de campo se realizaron en los últimos días de agosto y las primeras semanas de septiembre, en condiciones secas.

Cabe mencionar que para poder dimensionar mejor la evolución de los tratamientos se hace referencia a los datos de estudio de la caracterización inicial sin tratamiento por parte de Cerecedo en 2014, los cuales se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Caracterización de las muestras sin tratamiento por parte de Cerecedo en 2014.

	Cerecedo 2014						
ID	**%HIS**	**HC**	**%HIS/HC**	**MED 10**	**HTP**	**Toxicidad**	**WDTP**
GS-1	0.50	0.99	0.51	5.08	2,809	0%	21652099
GS-3	1.26	5.36	0.24	10.27	35,522	0%	7.53E+22
GS-4	0.72	4.66	0.15	11.71	24,634	0%	2.20E+47
GS-6	0.84	2.33	0.36	6.67	17,652	0%	3.26E+07
GS-7	0.58	1.01	0.57	5.03	2,986	0%	4.26E+05

De acuerdo con Cerecedo (2014), el análisis de textura mostró un contenido alto de arenas, así como un contenido de limos lo suficientemente alto para poder ser catalogado como apenas franco - arenoso (cuadro 6). Estos suelos se caracterizan por tener una densidad aparente seca promedio de 1800 kg/m^3 y con un espacio poroso de 31. 56 % lo que ocasiona una menor actividad microbiana ligado a la baja capacidad de retención de humedad del suelo (Hossne Garcia et al., 2009).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Cuadro 6. Composición de la textura del suelo caracterizado por Cerecedo 2014.

Muestra	%Arena	%Arcilla	%Limo
GS-1	82.56	4.36	13.08

6.2 Evaluación de los tratamientos desorción alcalina (AD) y desorción alcalina más enmienda orgánica (ADO) posterior a un año de tratamiento

6.2.1 Humedad *in situ*

La humedad en un suelo es de suma importancia, debido a que las raíces de las plantas y árboles extraen diariamente el agua disponible en el suelo, así mismo la radiación solar, la temperatura, condiciones del viento, duración del día y la madurez de la planta producen que la humedad almacenada en la zona superficial se evapore (Bolda y Dara, 2015). Sin embargo, los suelos que han sido expuestos a hidrocarburos suelen manifestar problemas en la capacidad de retención de agua debido a que fracciones del hidrocarburo se adhieren sobre la superficie de las partículas del suelo impidiendo que las moléculas de agua se fijen o infiltren a través de este. En la Figura 13 se muestran los resultados de la HIS (humedad *in situ*), respecto a la evolución de los tratamientos por AD y ADO con una secuencia de 2 años. Los valores iniciales respecto a las muestras ST del porcentaje de humedad indican un nivel pobre en la capacidad de retención de agua del suelo, siendo el nivel más alto de 1.26 % para la muestra GS-3ST y 0.50 % el nivel más bajo de la muestra GS-1ST.

El tratamiento por AD muestra una tendencia en el incremento del % HIS posterior al tratamiento, con un aumento promedio del 81.77 % del contenido de humedad respecto a su estado inicial (muestras ST). Respecto al tratamiento por ADO se observó una diferencia del 87.25 % de la HIS respecto a las muestras ST y una diferencia del 30.21 % del contenido de HIS respecto a los valores del tratamiento por AD en 2015. Sin embargo, la muestra GS-3 y GS-6 muestran una ligera disminución en el porcentaje de humedad posterior al tratamiento por ADO, este comportamiento puede estar relacionado con un aumento en la disponibilidad de las

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

moléculas del hidrocarburo que fueron desprendidas de las partículas del suelo posterior al tratamiento por NaOH quedando disgregadas sobre la superficie o por la acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos, limitando la interacción con elementos polares o iónicos en el suelo reduciendo la CC, la CIC y producir repelencia al agua Álvarez (2021). Doerr et al., (2000), menciona que estos compuestos pueden producirse por el metabolismo y la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales. No obstante, se puede visualizar como la incorporación de la enmienda orgánica logra un efecto favorecedor al ser incluido como parte del tren de tratamiento posterior a la aplicación de la desorción alcalina en aquellas muestras donde el tratamiento por AD no fue suficiente por sí solo, Porta et al., (2013) sugiere que las sustancias húmicas generadas por la MO aumentan la capacidad de retención del agua del suelo, la cual puede llegar a ser unas cinco veces mayor en comparación con los minerales de arcilla.

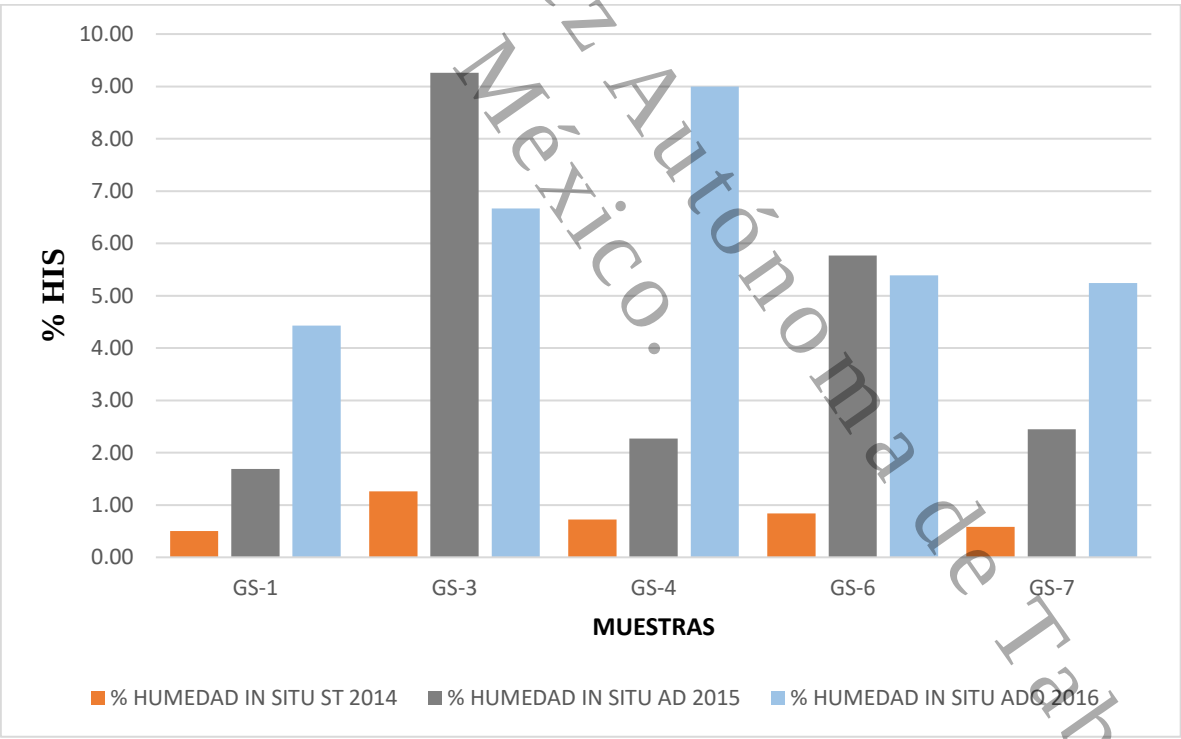

Figura 13. Comparación del % HIS (humedad in situ), respecto a los tratamientos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

6.2.2 Humedad crítica.

El tratamiento por desorción alcalina en 2015 mostró una reducción del 33 y 54 %, en los niveles de humedad crítica de los puntos de muestreo GS-3 y GS-4 respecto a los valores iniciales de las muestras sin tratamiento en 2014. Después de haber obtenido los resultados de los tratamientos por ADO en 2016, se puede apreciar que mediante la aplicación de la enmienda orgánica el porcentaje de humedad crítica de las muestras GS-3ADO y GS-4ADO redujeron sus niveles considerablemente, al punto que la muestras GS-4ADO2016 dejó de ser repelente, los resultados de estos parámetros indican que la aplicación de la desorción alcalina más la adición de la enmienda orgánica fue efectiva para estas muestras, devolviéndole la capacidad de absorber agua y repercutiendo en una mejoría de la vegetación predomínate. Según Shaxson & Barber, (2005) la reducción de la capacidad de un suelo para aceptar, retener y trasladar el agua reduce a su vez la productividad de la biomasa, ya sea de cultivos, pasturas, arbustos o árboles.

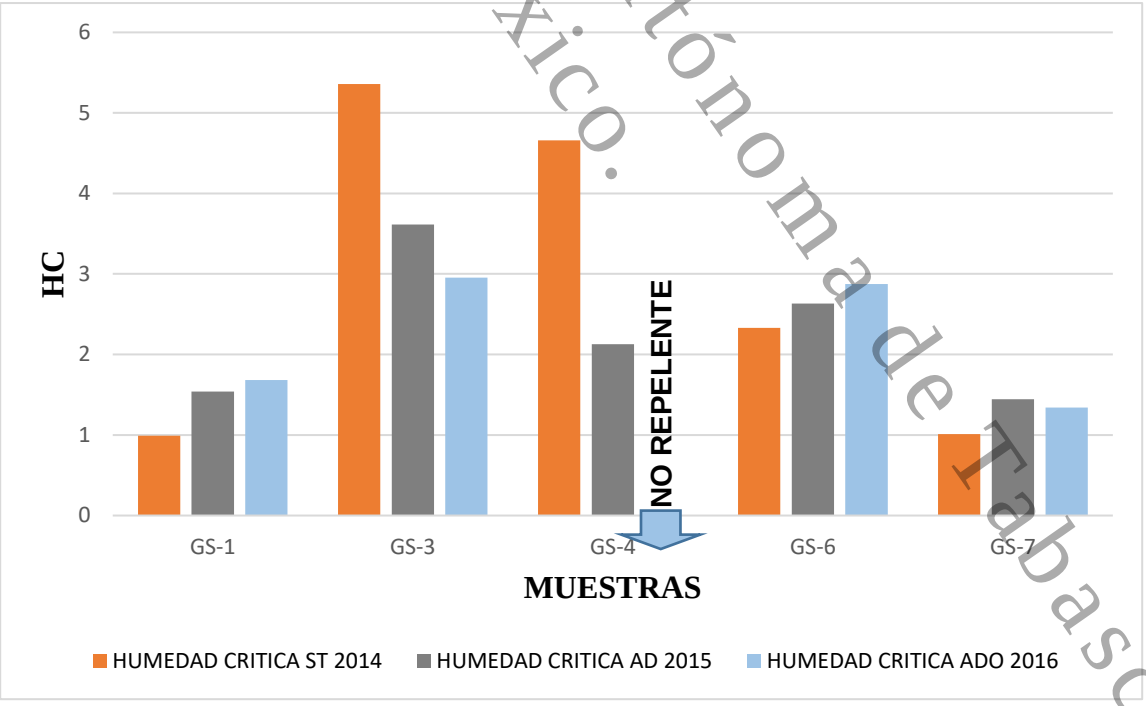

Figura 14. Comparación de la humedad crítica posterior a los tratamientos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Sin embargo, este comportamiento no aplico para el resto de las muestras, dado que durante la determinación de la humedad crítica se notó un comportamiento atípico posterior al tratamiento por AD y ADO como se aprecia en la Figura 14. Este efecto se pudo deber a la homogeneidad de las partículas del suelo, debido a la presencia de moléculas no polares dispersas como resultado del desprendimiento mediante el lavado del suelo con el NaOH, causando que al momento de realizar el WDPT se obtuviera inconsistencia en las lecturas, dado que, entre más intemperizado este el hidrocarburo más difícil es separarlo de las partículas del suelo, por lo que determinar el porcentaje de humedad crítica resulta más complicado. Adams et al., (2016) sugiere que los resultados de humedad crítica pueden variar dependiendo si este se realiza durante el ciclo de humectación o en el ciclo de secado debido a la histéresis del suelo. Por lo que determinar la humedad crítica en el ciclo de secado en las muestras que presentaban un nivel bajo puede haber causado imprecisión en las lecturas mostrando un incremento en el requerimiento del porcentaje de humedad.

En la Figura 15 se muestran la relación del porcentaje de humedad *in situ* con la humedad crítica de las muestras ST, AD y ADO. En esta gráfica se puede apreciar que las muestras sin tratamiento presentan una relación <1 por lo que las probabilidades de que en campo manifiesten problemas de repelencia es alta, mientras que las muestras tratadas con la desorción alcalina presentan un aumento considerable siendo del 2.56 el valor más alto para la muestra GS-3AD y 1.07 el valor más bajo para la muestra GS-4AD, lo cual indica que estas muestras podrían no presentar efectos hidrofóbicos en sitio o en su defecto una persistencia a la repelencia menor respecto a su estado inicial. En cuanto a las muestras del 2016 tratadas mediante ADO, todas ellas tuvieron una relación 1> indicando que la humedad *in situ* de las muestras en sitio es mayor que la humedad crítica, demostrando así que la adición de la enmienda orgánica contribuye notablemente al aumento de la retención de humedad.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

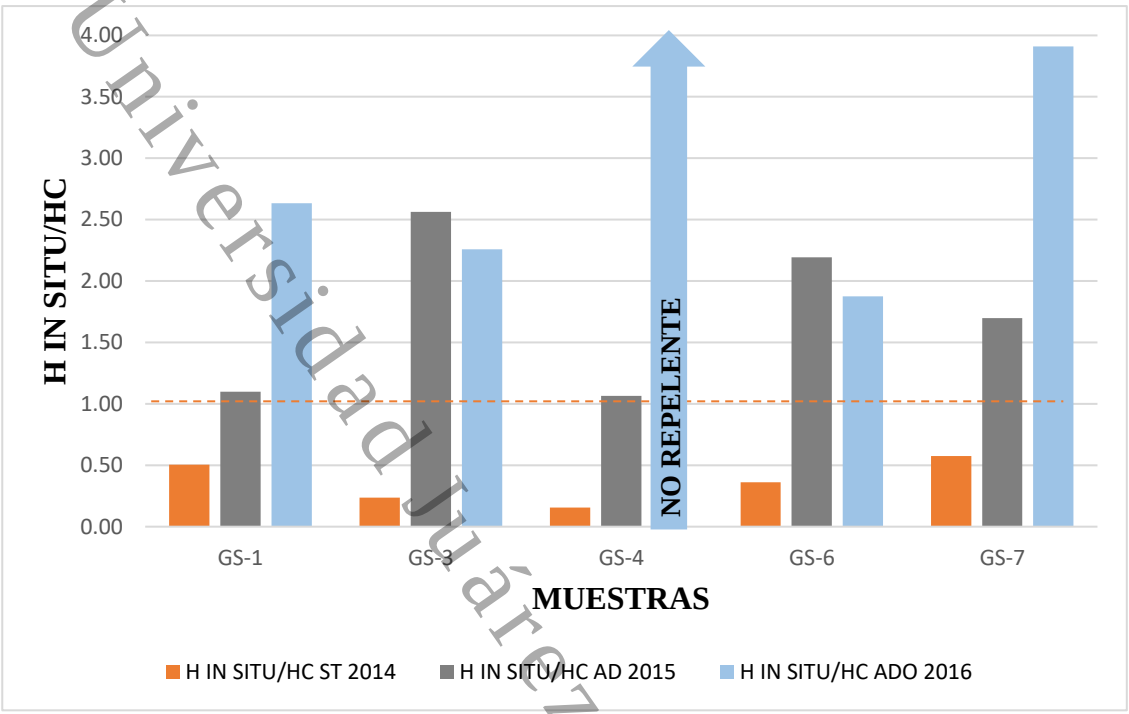

Figura 15. Relación entre la humedad in situ y la humedad crítica posterior a los tratamientos.

6.2.3 pH

Se observo que el pH presentado en las muestras de estudio refleja un comportamiento intrínseco al tratamiento por AD al manifestar un incremento en los niveles de alcalinidad respecto a sus niveles iniciales previo al tratamiento, ya que inicialmente las muestras del 2015 presentaban un pH neutro con excepción de la muestra GS-3ST que tenía un pH medianamente alcalino.

Posterior al tratamiento por AD se puede observar que la mayoría de las muestras presentan un pH medianamente alcalino con excepción de la muestra GS-7AD2015 la cual se encuentra dentro del rango neutro. Este comportamiento puede deberse a la adherencia de sales del NaOH entre los sitios de intercambio que neutralizan los iones de H^+. Los principales iones que pueden dar origen a la formación de sales son Ca, Na, Mg y K, por lo que mantener el equilibrio del pH se vuelve vital, dado la influencia que esta tiene en los diversos procesos químicos del suelo y el desarrollo de la vegetación (Inés, 2016).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

El tratamiento por ADO no tuvo un efecto significativo en el pH como se esperaba, sin embargo, este se comportó como amortiguador en las muestras que debido al tratamiento por AD tuvieron un ligero aumento en el pH, como en la muestra GS-1 y GS-3 que presentaba un nivel medianamente alcalino posterior a la aplicación de la desorción alcalina (Figura 16).

Para efectos de interpretación se utilizó la NOM-021-RECNAT-2000 y de acuerdo a lo mencionado en la norma, las muestras GS-1ADO, GS-4ADO y GS-6ADO están clasificadas como medianamente alcalinas, mientras que las muestras GS-3ADO y GS-7ADO se encuentran dentro del rango de un pH neutro, Bolda y Dara, (2015) mencionan que la interacción y disponibilidad de los nutrientes puede cambiar con el pH, por ejemplo, los macronutrientes y micronutrientes se encuentran más disponibles para que las plantas los absorban adecuadamente dentro del margen de 6.0 a 7.0. La solubilidad y disociación de muchas moléculas de los macro y micronutrientes se ve afectada indirectamente por el grado de pH influyendo más directamente sobre los microrganismos y enzimas del medio (Atlas y Bartha, 2002).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

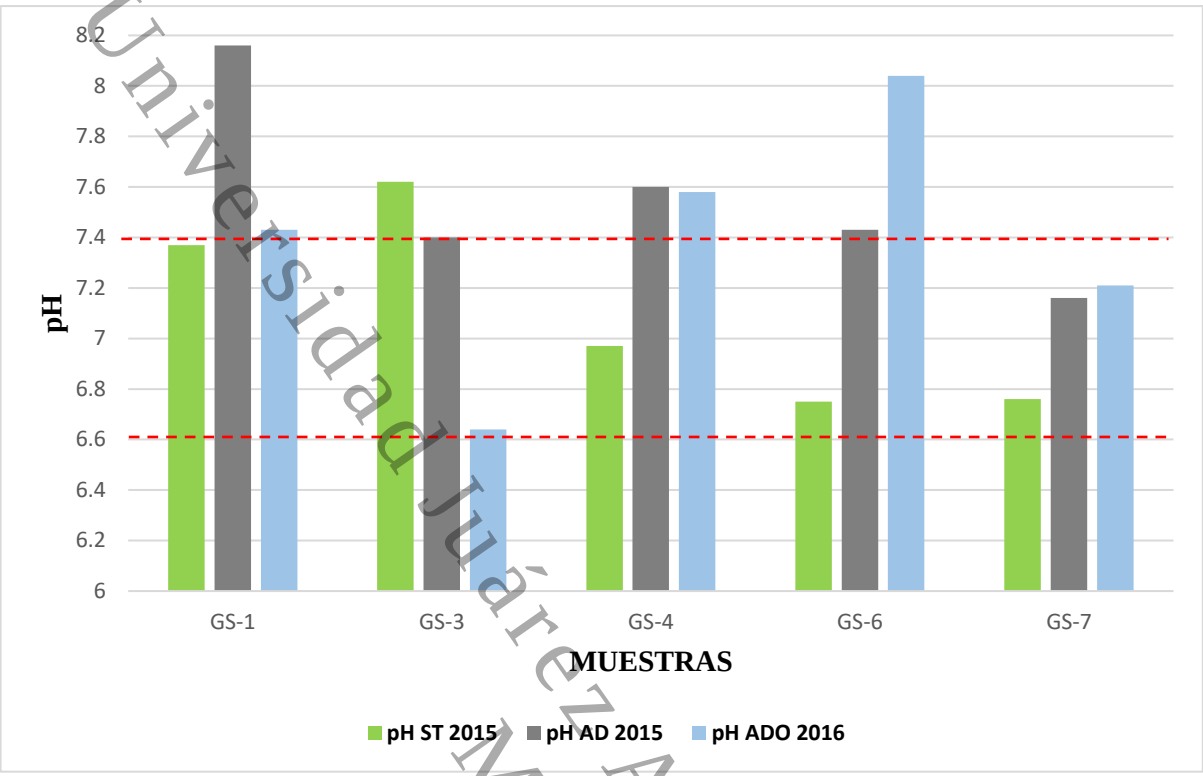

Figura 16. Comparación del pH respecto al tratamiento por AD y ADO

6.2.4 Conductividad eléctrica posterior al tratamiento por AD

Para determinar la existencia de posibles problemas de salinidad se realiza una prueba en la que se mide la CE en un extracto con relación (suelo-agua), este se basa en la obtención de un extracto acuoso de pasta saturada donde se mide el contenido de cationes y aniones disueltos en la solución.

En la Figura 17 se puede observar el comportamiento de la CE en función de los tratamientos, dado que al aplicar el tratamiento por desorción alcalina con NaOH se nota un ligero aumento en los valores de la CE con respecto al estado inicial de las muestras sin tratamiento del 2015 con un porcentaje promedio del 44%, mientras que el tratamiento por ADO mostro una reducción del 55% respecto al incremento causado por la desorción alcalina, ya que al incorporar la enmienda orgánica este actuó como amortiguador reduciendo los niveles de la CE ocasionados por las sales generadas del NaOH, a pesar de este comportamiento se puede notar que en ambos tratamientos no hubo incremento significativo en la CE que pudiera

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

repercutir en afectaciones o incremento de salinidad del suelo, dado que esta no supera los valores de referencia de la NOM-021- RECNAT-2000 la cual determina como efectos despreciables de salinidad a los suelos con CE <1 ds m-1, por lo que se puede decir que el tratamiento por AD puede causar un leve incremento en los niveles de salinidad, sin embargo, este no resulta agresivo para el suelo, edemas de que la adición de una enmienda orgánica como tren de tratamiento resulta eficiente al fungir como amortiguador, causando una disminución de las sales disueltas generadas por la aplicación del NaOH, permitiendo así que la vegetación predominante no resulte afectada durante su desarrollo. Según Bárbaro et al., (2005) la respuesta de la planta a una alta CE va a depender de la edad, condiciones ambientales, manejo de cultivo y características de la especie.

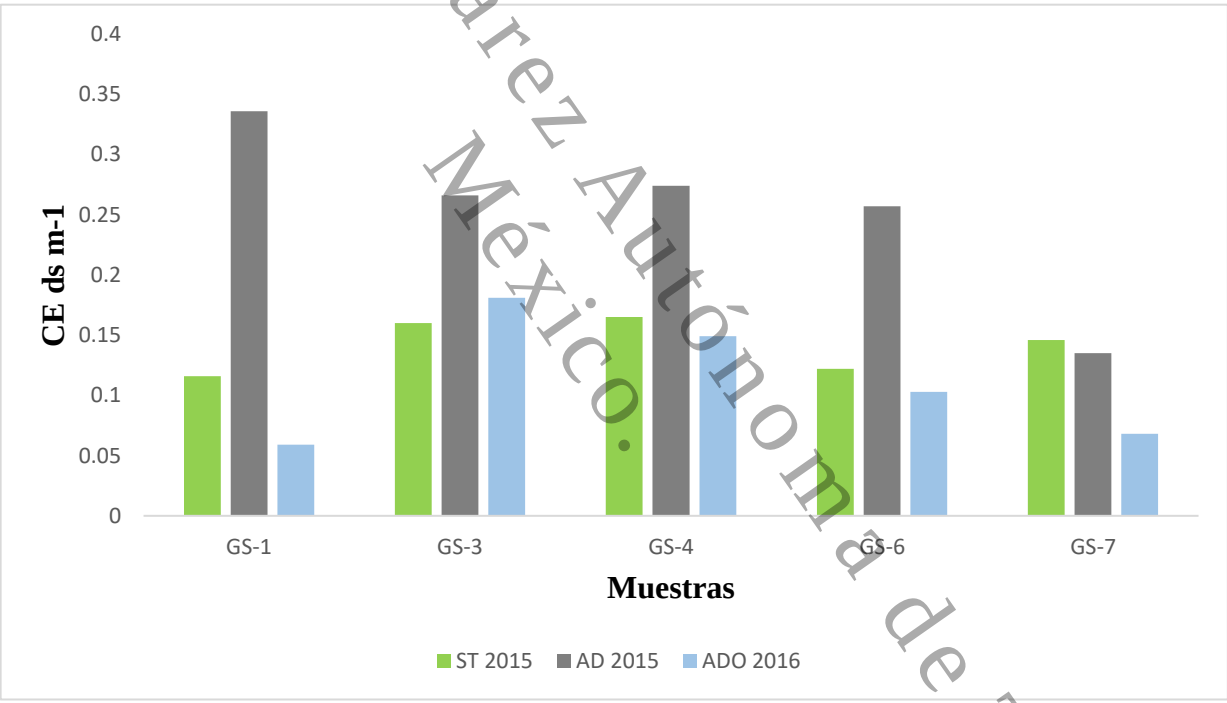

Figura 17. Conductividad eléctrica posterior a los tratamientos por AD y ADO.

6.2.5 Determinación del MED10 posterior a los tratamientos.

Para determinar la severidad de la repelencia (MED10) de las muestras de estudio del sitio contaminado, se utilizaron los valores obtenidos posterior al tratamiento por AD en 2015

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

y ADO en 2016, y se contrastaron con los datos obtenidos de la caracterización realizada por Cerecedo en 2014 los cuales se muestras en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Caracterización del MED respecto a los tratamientos

	MED 10		
ID	**CERECEDO ST 2014**	**AD 2015**	**ADO 2016**
GS-1	5.08	6.22	3.32
GS-3	10.27	4.94	5.96
GS-4	11.71	6.38	**N.R.**
GS-6	6.67	4.02	3.22
GS-7	5.03	4.46	4.07

N.R. No repelente

Las muestras tratadas mediante la desorción alcalina en 2015, tuvieron una reducción considerable respecto a las muestras del 2014 ya que todas presentaban un grado de repelencia muy severa. Todas las muestras mostraron una reducción en la severidad, con excepción de la GS-1, la cual presentó un ligero incremento posterior a la aplicación del tratamiento por AD, sin embargo, al aplicar la enmienda en 2015 este redujo nuevamente el grado de severidad incluso por debajo del valor de las muestras ST.

Las muestras tratadas con ADO posterior al tratamiento por AD, mostraron valores satisfactorios con una reducción significativa. La muestra GS-1 pasó de tener un MED inicial ST de 5.08, a un MED de 6.22 con AD y con ADO de 3.32, la muestra GS-3ADO2016 presentó un ligero aumento del MED de 5.96 en comparación al valor obtenido posterior al tratamiento por AD en 2015, el cual tenía un MED de 4.94. Sin embargo, todavía se encontraba por debajo del grado de severidad presentado en su estado inicial sin tratamiento. El resto de las muestras tratadas por ADO mantuvo una tendencia en la reducción de la severidad de la repelencia, sin embargo, la muestra GS-4 fue la que mejores resultados obtuvo, pasando de tener un MED inicial ST de 11.71, a un MED de 6.38 con AD, finalizando con su estado repelente en 2016 con la aplicación del tratamiento por ADO.

Los resultados del tratamiento por desorción alcalina en 2015 mostraron una reducción significativa con un porcentaje promedio del 33% respecto al grado de severidad presente de las

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

muestras sin tratamiento en 2014, esto demuestra que la tecnología implementada que es la desorción alcalina, funciona de manera satisfactoria, produciendo la separación del hidrocarburo que se encuentra unido a través de los puentes de hidrogeno y las fuerzas de Van Der Walls a la materia orgánica, mientras que esta a su vez se encuentra unida a las partículas del suelo a través de enlaces iónicos (Adams, 2011). Ocasionando que, al agregar el NaOH al suelo, los cationes del Na^+ sustituyan las cargas positivas de la materia orgánica que se encuentra adheridas en la superficie mineral de las partículas del suelo, mientras que los iones del OH^- desplazan las cargas negativas de la superficie del suelo. Permitiendo así el desprendimiento de la materia orgánica de la parte mineral del suelo y como resultado la separación del hidrocarburo que se encuentra unido a la materia orgánica.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

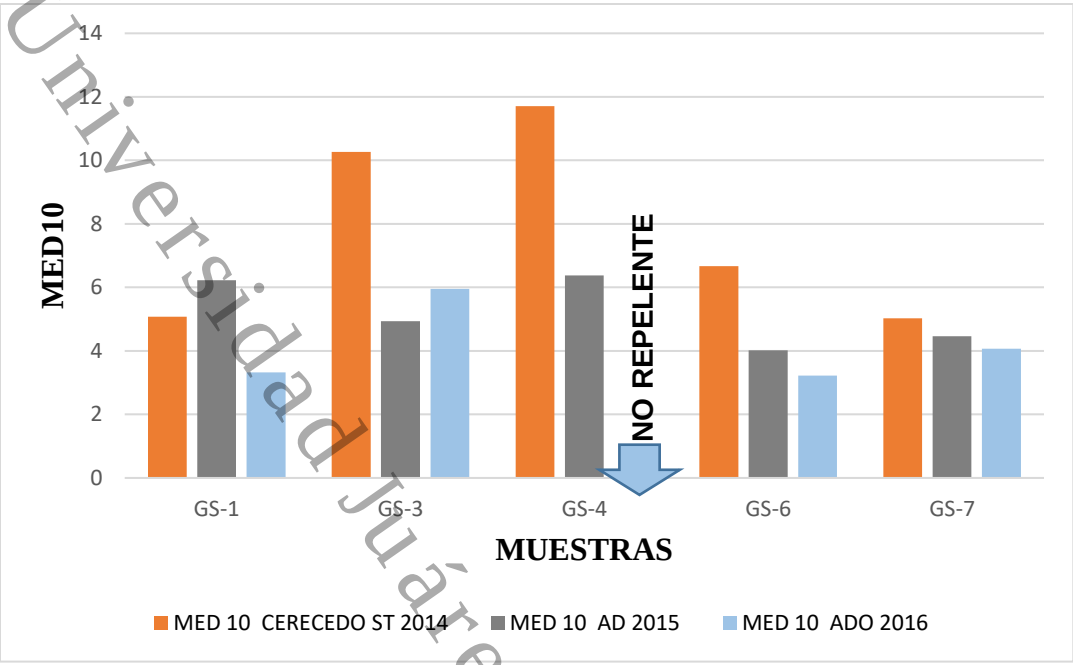

Figura 18. Determinación del MED10 posterior al tratamiento por AD.

6.2.6 Determinación del HTP.

La importancia del análisis de cuantificación de hidrocarburos radica en poder obtener la concentración del hidrocarburo presentes en las muestras del suelo, dado que nos permite determinar si existe una interrelación entre los niveles de concentración con el estado hidrofóbico del suelo.

La Figura 19 muestra los resultados obtenidos para HTP, donde podemos observar que el tratamiento por AD mostró una disminución considerable en la concentración del hidrocarburo presente de las muestras del suelo contaminado, en comparación con los niveles del 2014. La concentración inicial del suelo no tratado fue aproximadamente entre 3,000 y 35,500 mg/kg (Cuadro 8)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

	Concentración HTP (mg/kg)		
ID	**Cerecedo ST 2014**	**AD 2015**	**ADO 2016**
GS-1	2,809	5,772	3,646
GS-3	35,522	11,727	6,046
GS-4	24,634	14,818	6,296
GS-6	17,652	3,515	3,527
GS-7	2,986	4,943	3,834

Cuadro 8. Concentración de HTP respecto a los tratamientos

Las muestras GS-3AD, GS-4AD y GS-6AD, mostraron una reducción significativa en los niveles de HTP, respecto a los valores de las muestras sin tratamiento en un 67, 40 y 80%. Respecto al tratamiento por AD se puede notar que las muestras que tenían una concentración de HC más elevada, fueron las que mostraron un porcentaje de reducción mayor en los HTP, esto puede ser debido a una mayor disponibilidad de las moléculas del hidrocarburo sobre la superficie del suelo, las cuales fueron removidas fácilmente por la aplicación del NaOH. El comportamiento de las muestras GS-1AD y GS-7AD las cuales presentaban una concentración inicial más baja en comparación con las otras muestras, pudo ser ocasionado debido a que las fracciones del hidrocarburo presente en las muestras ST era más recalcitrante, dado que este suelo fue sometido a una quema inducida con anterioridad, por lo que romper sus enlaces resulto más difícil para el tratamiento por el NaOH o debido a la heterogeneidad de la muestra, y la toma de la submuestra al momento de analizarlo.

El tratamiento por ADO mantuvo el mismo comportamiento en relación a la concentración de HTP en las muestras, obteniendo los siguientes resultados; muestra GS-3 paso de tener un HTP de 5,772 mg/kg con tratamiento AD a 3,646 mg/kg con ADO, mientras que la muestra GS-4 redujo los niveles de 14818 mg/kg con AD a 6,296 mg/kg con ADO. Sin embargo, la muestra GS-6ADO no mostro diferencia significativa en la concentración de hidrocarburos respecto al tratamiento AD, presentando una concentración ya muy baja (aprox. 3,500 mg/kg) con solo el tratamiento AD.

Los valores obtenidos de las muestras GS-1 y GS-7 posterior a los tratamientos, manifestaron un incremento en la concentración del HTP en comparación con los niveles de las

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

muestras sin tratamiento, este comportamiento probablemente se deba a que las muestras no presentaran una homogeneidad al momento de ser colectada o que la materia orgánica añadida posterior al tratamiento por AD presentara una acumulación de las moléculas del hidrocarburo, agregadas mediante escorrentía superficial o percolación de las zonas contaminadas más elevadas.

La cuantificación del HTP demostró una tendencia en la reducción de la concentración del hidrocarburo, esto se pudo apreciar al realizar la comparación de los valores obtenidos de las muestras contaminadas sin tratamiento con las muestras tratadas por AD y ADO. A pesar de la reducción del hidrocarburo, las muestras todavía se encontraron por arriba del nivel de referencia para uso agrícola de la Norma Oficial Mexicana (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012) la cual establece un nivel máximo de 1,200 mg/kg para hidrocarburos de fracción media. Sin embargo, considerando que el sitio fue quemado justo después del derrame y ha experimento décadas expuesto a la intemperie post-derrame, es probable que los hidrocarburos aún presentes son más parecidos a una fracción pesada. En el estudio de Cerecedo (2014) se encontró que el aceite todavía presente en el sitio tuvo aprox. 17 °API (correspondientes a aceite pesado) aunque el crudo derramado en 1979 era de 37 °API. En este contexto puede ser más congruente aplicar el criterio en la norma para la fracción pesada (3,000 mg/kg para sitios de uso no industrial), y

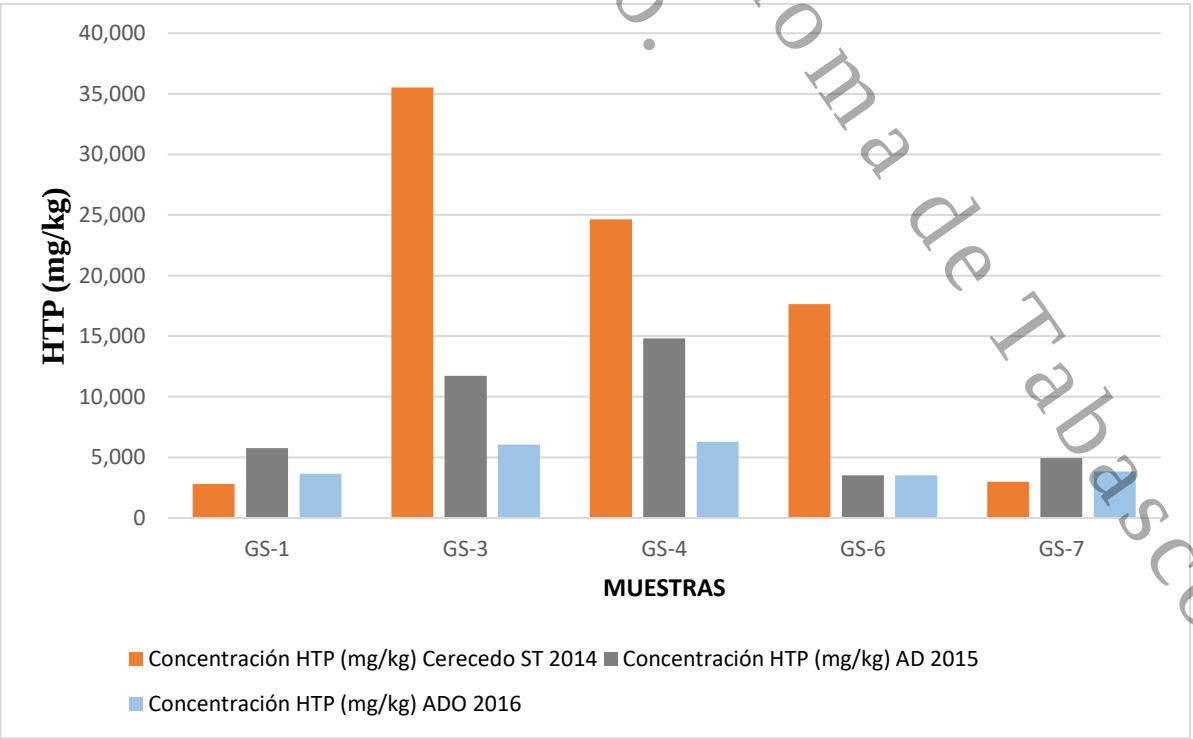

Figura 19. Cuantificación de HTP posterior a los tratamientos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

tres de las cinco muestras están cerca a este nivel. Por otra parte, aunque los niveles de hidrocarburos en las otras muestras están más que el doble de este nivel, la relación de humedad *in situ* vs. humedad crítica indican que no se manifestará repelencia al agua en el campo. La mejor reducción se presentó en la muestra GS-3, llegando a obtener una reducción del 83 % puesto que contaba con una concentración inicial de 35,522 mg/kg y obtuvo una disminución a una concentración de 6,046 mg/kg al finalizar el tratamiento con ADO, este comportamiento concuerda con el estudio mencionado a escala de laboratorio de Contreras (2017) quien evaluó el acondicionamiento de cachaza de caña como sustrato orgánico para estimular los procesos de biodegradación mediante la actividad microbiana, obteniendo una reducción del 67.90 % en los niveles de HTP y pasando de tener un suelo severamente repelente a un suelo ligeramente repelente.

6.2.7 Evaluación de la toxicidad por *Eisenia foetida* posterior a los tratamientos por AD y ADO.

La determinación del estudio de toxicidad resulta indispensable en todo tratamiento de remediación de suelo contaminado, dado que el desarrollo y mantenimiento de la rizosfera resulta vital para una evolución favorable de los sitios contaminados. En la rizosfera la actividad biológica es muy elevada ya que contiene microorganismos (bacterias, hongos). Las raíces segregan sustancias que aumentan el contacto suelo-raíz, son utilizadas por los microorganismos y pueden afectar el uso eficiente de nutrientes por los cultivos (Porta et al., 2013).

Los valores obtenidos de los tratamientos por AD y ADO respecto a la toxicidad fueron evaluados respecto la caracterización inicial en 2014 por Cerecedo, para tener una visualización en el comportamiento del suelo en función a los tratamientos, los datos se muestran en el Cuadro 9. La caracterización del 2014 indica que el suelo de Bemidji no presenta toxicidad, posiblemente se deba a que el derrame sucedió hace poco más de 40 años y los hidrocarburos han sufrido una gran meteorización, además de haber sido quemados. Durante este periodo, las moléculas más livianas y toxicas, se han volatilizado, biodegradado o fotodegradado (Adams et al., 2016).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Cuadro 9. Comparación de la toxicidad respecto a los tratamientos.

	Toxicidad		
ID	Cerecedo 2014	AD 2015	ADO2016
GS-1	0%	100%	0%
GS-3	0%	0%	0%
GS-4	0%	80%	0%
GS-6	0%	0%	0%
GS-7	0%	10%	0%

De acuerdo a los resultados del análisis de toxicidad mediante el bioensayo con *Eisenia foetida* durante las dos etapas del tratamiento, se puede observar cómo hay un incremento significativo en el porcentaje de mortalidad en relación al tratamiento por AD, con un incremento del 100% para la muestra GS-1AD, 80% para GS-4AD y 10% para la GS-7AD en relación a su estado inicial, el cual no presentaba toxicidad alguna.

Durante la evaluación de las primeras 24 h se pudo visualizar un ligero descenso en la respuesta de estímulos y liberación de líquido celómico de las muestras GS-1AD2015 y GS-4AD2015, teniendo un cambio de coloración rojiza a oscura, este efecto puede estar relacionado al tratamiento mediante el NaOH dado que estas muestras presentaron un ligero incremento en el pH con valores de 7.6 a 8.1 posterior al tratamiento por desorción alcalina, caracterizando al suelo como medianamente alcalino, lo que podría haber ocasionado un sistema poco apto para la supervivencia del organismo. Estos organismos son capaces de ingerir volúmenes grandes de suelo y su respuesta frente a los contaminantes puede analizarse conforme a su supervivencia, comportamiento y reproducción (Viñas & Solanas, 2005). Según (Mejía, 2010) la *Eisenia foetida* cuenta con un nivel óptimo de pH de 6.5 a 7.5 para su desarrollo, sin embargo, puede alcanzar un adecuado rendimiento con rangos de pH de 5 a 8.4, humedad del 75% y temperatura entre 15 y 25°C.

Para las muestras tratadas con ADO se observó como al añadir la enmienda orgánica el porcentaje de mortalidad se reduce a 0% en todas las muestras tratadas, por lo que se puede decir que la incorporación de una enmienda orgánica como tren de tratamiento para la aplicación de la desorción alcalina en suelos contaminados con hidrocarburos resulta eficiente para este parámetro.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

6.2.8 Nitrógeno

La determinación del porcentaje de nitrógeno total (%NT) se realizó mediante el método indirecto, realizando los cálculos correspondientes de acuerdo los autores que especifican que el nitrógeno amoniacal representa del 2 al 5% del %NT Oliveira y Mayor (2006). Tomando como referencia la norma NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 10), se puede observar que las muestra GS-3ADO presenta un porcentaje bajo, mientras que las muestras GS-1ADO, GS-4ADO y GS-6ADO muestran un %NT medio, así mismo, la muestra GS-7ADO y la enmienda utilizada para los tratamientos presenta un valor alto en la concentración del porcentaje de nitrógeno total, lo cual se puede apreciar en la Figura 20. El aporte de nitrógeno, generalmente se encuentra asociada con polifenoles, polisacáridos, residuos de lignina y otros productos de la degradación de las plantas, por lo que, al agregar una enmienda orgánica como tren de tratamiento, podría estimular el crecimiento de los microorganismos del suelo, y el desarrollo de la vegetación predominante.

La materia orgánica es indispensable para la actividad biológica del suelo dada la importancia que los macronutrientes tienen para el desarrollo de la vegetación, sus aportes pueden tener lugar en la superficie, entre los intersticios del suelo, a partir de las raíces, sus exudados y de los microorganismos. Por ejemplo, el nitrógeno es un macronutriente esencial para las plantas y a pesar de que este se encuentra en la atmosfera en grandes cantidades, solo puede estar biodisponible para las plantas en forma de ion nitrato, $N\text{-}NO_3$ y como ion amonio, $N\text{-}NH_4^+$.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

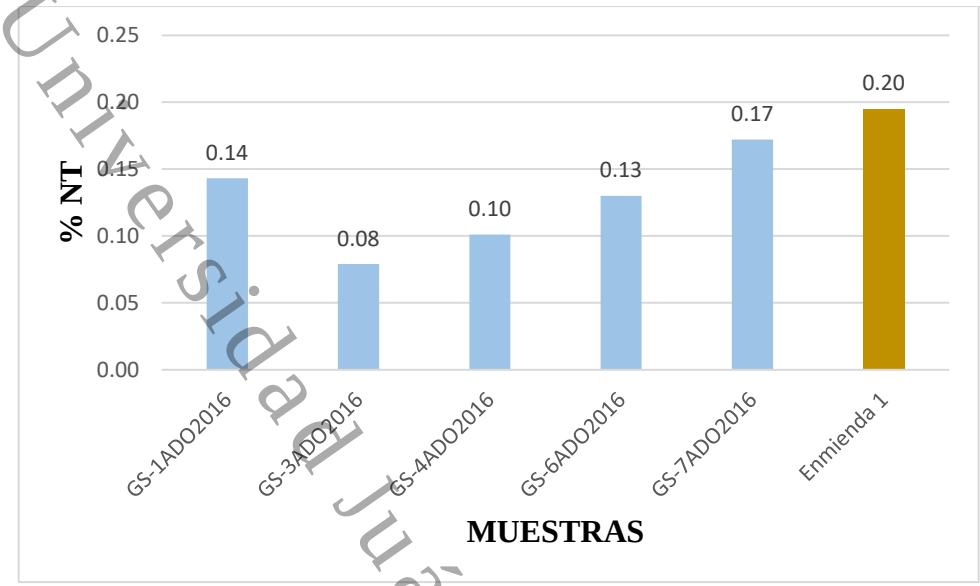

Figura 20. Porcentaje de nitrógeno total.

Cuadro 10. Cuadro de clasificación del porcentaje del nitrógeno total.

Clase	% Nitrógeno total
Muy bajo	<0.05
Bajo	0.05 - 0.10
Medio	0.10 - 0.15
Alto	0.15 - 0.25
Muy alto	>0.25

6.2.9 Carbón orgánico soluble y materia orgánica

El COS (carbón orgánico soluble), es utilizado para determinar la cantidad de carbono fácilmente disponible de la materia orgánica para los microorganismos del suelo y otros elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente bajo. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico, modifica la alcalinidad y la acides hacia valores cercanos a la neutralidad, además, es el principal elemento que forma parte de la MOS, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente uno del otro (Eduardo Martínez et al., 2008). En la figura 21 se puede ver como

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

la relación entre el COS/MOS incrementa en función a un año de evaluación posterior a su tratamiento, posiblemente este se deba a una degradación de compuestos como la lignina, celulosas y hemicelulosas de la enmienda orgánica, dado que esta se encuentra conformada en su mayoría por madera triturada, la cual puede presentar una degradación menos tardía en comparación a los compuestos como las ceras, resinas o taninos, por lo que al haber un descenso en el porcentaje de materia orgánica el COS se incremente proporcionalmente.

La materia orgánica del suelo (MOS) suele identificarse en campo por la presencia de oscurecimiento en la parte superior del suelo, producida por la acción de la descomposición de los restos de vegetales, animales, mesofauna y microfauna. La MOS constituye un valor

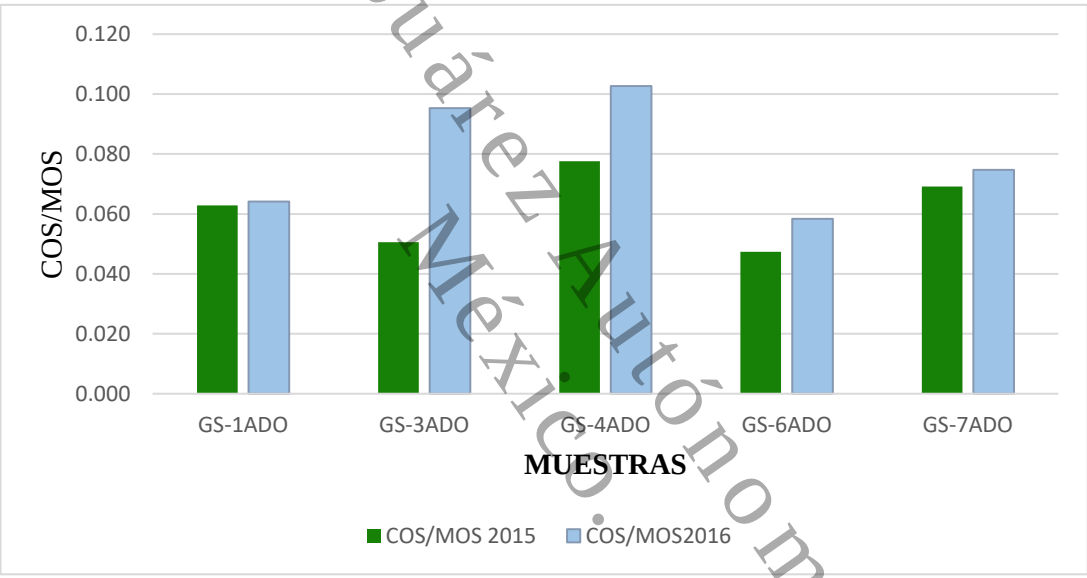

Figura 21. Relación carbón orgánico soluble y materia orgánica

importante de la calidad del suelo, dado que representa una fuente de alimentos y energía para los microorganismos del suelo, ya que a través del proceso de mineralización esta libera macronutrientes para las plantas: nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros, así como micronutrientes que al biodegradarse puede liberar vitaminas y aminoácidos (Porta et al., 2013).

En la Figura 22 se puede visualizar el comportamiento del %MOS con un año de tratamiento, las muestras GS-1ADO2016, GS-3ADO2016 y GS-4ADO2016 muestran un descenso en el porcentaje de materia orgánica en comparación con las muestras del 2015, este comportamiento puede estar ligado a la biodegradación de la materia orgánica por la acción de los microorganismos del suelo, dado que los restos orgánicos no permanecen intactos, sino que

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

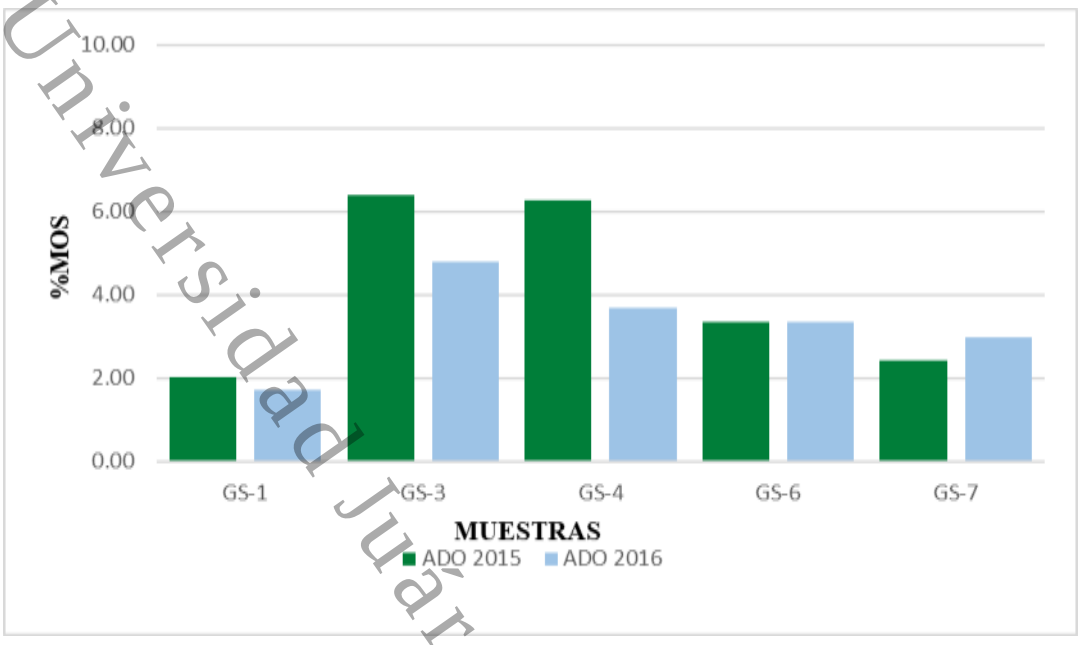

Figura 22. Porcentaje de materia orgánica respecto a los tratamientos por ADO

están sujetos a la actividad biológica de la fauna del suelo y acción microbiana, dando lugar a la formación de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, Porta et al., (2013), describe que la MOS pasa por cuatro procesos fundamentales que actúan en paralelo en un mismo suelo, lo que explica la coexistencia de productos resultantes muy diversos: fragmentación, descomposición, mineralización y humificación. Una de las condiciones óptimas para la descomposición de la MOS es la disponibilidad de agua, por lo que un suelo afectado con problemas de repelencia repercute en el proceso de descomposición de la MOS ocasionando un descenso en el enriquecimiento microbiano, los cuales son indispensable para la degradación de contaminantes como lo es el hidrocarburo. Es por esto que al incorporar la enmienda orgánica a los tratamientos por desorción alcalina se espera que esta sirva a través de procesos de humificación como estabilizador y fuente de alimento para el desarrollo de microorganismos capaces de degradar las fracciones del hidrocarburo disponibles en la superficie del suelo. Respecto a las muestras GS-6ADO y GS-7ADO, esta puede estar relacionado a la aportación de materia orgánica particulada por efectos de escorrentía, dado que a unos pocos metros de la celda de tratamiento se pudo apreciar la presencia de un área recuperada con restos de materia orgánica particulada y hojarasca (Adams, comunicación personal, 13 de diciembre del 2019). Como criterio de interpretación se usó la tabla de clasificación de la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Donde se puede visualizar que las muestras presentan un %MOS en el rango de medio a muy bajo, mientras que la enmienda utilizada muestra un porcentaje muy alto en el porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 11. Cuadro de interpretación del porcentaje de materia orgánica de la NOM-021-RECNAT-2000.

	% Materia orgánica	
Clase	**Suelos volcánicos**	**Suelos no volcánicos**
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

7 CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio, presentaron una evolución favorable respecto al tratamiento por AD y ADO, como alternativa para el tratamiento de suelos hidrofóbicos contaminados con hidrocarburos, el cual permita una reducción en la concentración del hidrocarburo, la capacidad de absorber agua y el desarrollo de la vegetación endémica.

- Tratamiento AD, mostró una reducción en la concentración de los HTP, MED y humedad crítica posterior a un año de la aplicación, sin embargo, efectos de toxicidad se vieron reflejados en la muestra GS-1AD con 100% de mortalidad y GS-4AD con 80%.

- Tratamiento ADO, obtuvo una mejoría significativa en las variables dependientes como la humedad crítica, HTP y MED, reduciendo la severidad a la repelencia al grado que la muestra GS-4 no era repelente al evaluarla con un año de aplicación. Respecto a la toxicidad cabe mencionar que el porcentaje de mortalidad de las muestras GS-1AD y GS-4AD se redujeron a cero, posterior a la aplicación de la enmienda orgánica.

Con relación a la repelencia se pudo observar que la muestra GS-3ADO y GS-4ADO, presentaban una concentración similar en los niveles de HTP con una diferencia de 256 mg/kg, sin embargo, la muestra GS-3ADO presentó una severidad con un MED de 5.96, mientras que la GS-4ADO ya no era repelente, lo que podría indicar que los efectos hidrofóbicos podrían estar relacionados con el grado recalcitrante del hidrocarburo o con algún elemento hidrofóbico en la matriz del suelo generado por la quema inducida a la que fue expuesta el suelo. De acuerdo a Jaramillo (2006), la acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos podría estar relacionados con la vegetación, prácticamente todos sus órganos contienen compuestos hidrofóbicos que debido a la descomposición los libera cuando la planta o algunos de sus órganos mueren, a través del lavado de las superficies vegetales o porque fluyen hacia el suelo en forma de exudados.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Los valores obtenidos del tratamiento por ADO en 2016 mostraron un descenso en promedio del 36% en los niveles del MED con respecto a los niveles alcanzados en las muestras AD en 2015. Al comparar el porcentaje promedio de la severidad presente en las muestras del 2014 y contrastarla con los valores obtenidos al finalizar el tratamiento en 2016 con ADO, se puede notar una reducción del 57% respecto a la severidad en su estado inicial.

Los análisis de MOS mostraron un efecto positivo entre la relación del %HIS con el contenido de materia orgánica, permitiendo así una mejoría en la calidad del suelo, principalmente en la estructura y la retención de agua; para la muestra GS-1ADO se pudo observar un %MOS del 1.73 con un %HIS de 4.43 siendo esta el valor más bajo, mientras que la muestras GS-4ADO presento un %MOS de 6.28 con un %HIS de 9.00 y sin indicios de repelencia.

El tratamiento por desorción alcalina presentó un incremento del 82% en el porcentaje de humedad del suelo, mientras que la aplicación de la enmienda orgánica obtuvo un aumento respecto al nivel inicial del 87% en la humedad *in situ.* A pesar de que no hubo un gran incremento en el %HIS posterior al tratamiento por AD, se pudo observar que la enmienda orgánica proporcionó la capacidad de absorber agua en aquellas muestras que todavía presentaban un nivel bajo de humedad. Como resultado los niveles de humedad crítica, se vieron afectados de manera positiva, permitiendo una relación >1 entre la humedad *in situ* y la humedad crítica, lo que podría indicar que estas muestras no presentan problemas de repelencia al agua en sitio o en su defecto la persistencia respecto al tiempo de infiltración de las moléculas de agua en el suelo debería ser corta, devolviéndole al suelo la capacidad de retener humedad y nutrientes catiónicos que le ayuden a vencer los efectos generados por la repelencia, de esta manera la aplicación de una enmienda orgánica posterior al tratamiento por desorción alcalina, demuestra el beneficio para la recuperación del suelo de Bemidji, Minnesota.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

8 RECOMENDACIONES

Las propiedades del suelo posterior a los tratamientos por AD y ADO demostraron que en efecto la desorción alcalina causa una remoción del hidrocarburo adherido a la superficie del suelo, sin embargo, las zonas en donde hidrocarburo se encuentra en menores concentraciones parecen estar más recalcitrante lo que podría disminuir la eficiencia del tratamiento en estas áreas, se recomienda evaluar la posibilidad de incrementar la dosis del NaOH o en su defecto realizar el lavado de suelo dos veces al año en estos puntos.

Considerando que el sitio de estudio fue sometido a una quema inducida para eliminar el hidrocarburo y debido a las características del suelo arenoso y a los efectos ocasionados por las concentraciones del hidrocarburo, sería adecuado que durante el periodo del tratamiento por desorción alcalina y la adición de la enmienda orgánica, se incorporaran técnicas de arado por lo menos cada seis meses, para permitir la homogeneización del suelo y la ruptura de las moléculas del hidrocarburo con la materia orgánica y las partículas del suelo, así se podría incrementar la recuperación del suelo en un tiempo más corto.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

9 REFERENCIAS

Adams, R. H., Cerecedo-López, R. A., Alejandro-Álvarez, L. A., Domínguez-Rodríguez, V. I., & Nieber, J. L. (2016). Treatment of water-repellent petroleum-contaminated soil from Bemidji, Minnesota, by alkaline desorption. International Journal of Environmental Science and Technology, 13(9), 2249–2260. https://doi.org/10.1007/s13762-016-1058-4

Adams, R. H.; Guzmán Osorio, F. J.; Zavala Cruz, J., (2008). Water repellency in oíl contaminated sandy and clayey soils. Int. J. Environ. Sci. Tech., 5 (4), 445-454

Adams, Randy H, ZaVala-Cruz, Joel, & Morales-García, Fernando. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. Ii: afectación a la fertilidad y su recuperación. Interciencia, 33(7), 483-489. Recuperado el 14 de diciembre de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037818442008000700005&lng=es&tlng=es.

Alejandro Álvarez, L. A. (2015). Aplicación secuencial de la tecnología desorción alcalina para remediar un suelo arenoso hidrofóbico contaminado con petróleo crudo procedente de Bemidji, Minnesota (tesis de maestría) Universidad Autónoma de Guadalajara Campus Tabasco.

Álvarez Coronel G. (2021). Efecto de las arcillas en la fertilidad de suelos contaminados con petróleo crudo. (tesis de doctorado) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Atlas R., Bartha R. (2002). Ecologia microbiana y Microbiologia Ambiental. 4ta Edición, Editorial Addison Wesley. Madrid España. pp.

Ávila Acosta, C. R. (2014). Efectos de la intemperización en las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con petróleo (tesis de maestría). Villahermosa, Tabasco: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Baii, M., Guillén, A., & Abreu, J. (2017). Sustentabilidad y petróleo. International Journal of Good Conscience, 42-64. ISSN 1870-557X

Bárbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2005). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas. Instituto de Floricultura CIRN, 1–15. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia _del_ph _y_la_ conductividad_elctrica.pdf

Barrios Ziolo, L. F., Robayo Gómez, J., Prieto Cadavid, S., & Cardona Gallo, S. A. (2015). Biorremediación de suelos contaminados con aceites usados de motor. *Cintex*, *20*(1), 69–96.

Belinchón, F. (2018). Los 10 países con las mayores reservas de petróleo del mundo. Recuperado el 27 de noviembre de 2019, de Business insider: https://www.businessinsider.es/10-paises-mayores-reservas-petroleo-mundo-249164

Bolda, M., y Dara, S. K. (2015). Manual de Producción de Fresa para los Agricultores de la Costa Central (2a ed.). California, Estados Unidos: Mimeo. Recuperado de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

http://cesantabarbara.ucanr.edu/files/228580.pdf

Brady, C. N. and R. R. Weil (1999). The nature and properties of soils, Prentice Hall.

Cerecedo López, R.A. (2014). Desorción alcalina aplicada a un suelo arenoso hidrofóbico contaminado con petróleo crudo de Bemidji, Minnesota (tesis de licenciatura) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Contreras Pérez, M.G. (2017). Desorción alcalina con adición de cachaza de caña para la remediación de un suelo arenoso contaminado con hidrocarburos (tesis de maestría) Universidad Autónoma de Guadalajara Campus Tabasco.

DeBano, L.F. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. Journal of Hydrology, 231-232, 4-32

Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. (1996a). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. Catena, 28, 89-105.

Dekker, l. W., Ritsema, C. J. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. Water Resources Research, 30: 2507-2517

Delin, G., Essaid, H., Cozzarelli, I., & Lah, M. (1998). Ground Water Contamination by Crude Oil near Bemidji, Minnesota. Bemidji: Servicio Geológico de EE. UU.

Doerr, S.H. y Thomas, A.D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal, Journal of Hydrology, 231-232, 134-147

Dorn, P.B., T. E. Vipond J.P. Salanitro y H. L. Wisniewksi. (1998). Assessment of the acute toxity of crude oils in soil using earthworms, microtox and plants. Chemosphere 37(5): 845-860

Domínguez-Rodríguez, V. I., Adams, R. H., Sánchez-Madrigal, F., Pascual-Chablé, J. de los S., & Gómez-Cruz, R. (2020). Soil contact bioassay for rapid determination of acute toxicity with Eisenia foetida. Heliyon, 6(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03131

Eyherabide, m., Saínz rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, h. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. Ciencias del suelo, 13-19. Recuperado el 30 de enero de 2020.

Essaid, HI, Bekins, BA, Herkelrath, WN y Delin, GN (2009). Crude oil at the Bemidji site: 25 years of monitoring, modeling, and understanding. Ground Water, 49 (5), 706–726. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00654.x

Fernández Linares, L. C., Rojas Avelizapa, N. G., Roldán Carrillo, T. G., Ramírez Islas, M. E., Zegarra Martínez, H. G., Uribe Hernández, R., Arce Ortega, J. M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. México, D.F.: Instituto Mexicano del Petróleo Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología.

Hossne García, A., Mayorca Jaime, Y. N., Salazar Bastardo, L. D., Subero Llovera, F. A., & Zacillo Contreras, A. M. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

dos suelos franco arenoso de sabana del estado monagas, venezuela. *Revista Cientifica UDO Agricola*, *9*(4), 937–950.

Jaramillo, D. F. J. (2006). Repelencia Al Agua En Suelos: Una Síntesis. Rev. Acad. Colomb. Cienc, 30(115), 215–232.

Jenkinson, D.C. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. IV. The decomposition of fumigated organisms in soil. Soil Biol. Biochem. 8: 203-208.

King, P. (1981). Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. Soil Research, 19(3), 275. https://doi.org/10.1071/sr9810275

Martínez H, Eduardo, Fuentes E, Juan Pablo, & Acevedo H, Edmundo. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8(1), 68-96. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006

Mejia, P. (2010). Manual lombricultura. Agroflor Lombricultura, 01 963, 54. https://cdn.website-editor.net/a6d5d07bd07b4ebbb41c70f03402e2a8/files/uploaded/Manual%2520de%2520lombricultura.pdf%0Ahttp://agro.unc.edu.ar/~biblio/Manual de Lombricultura.pdf

NOM-021-RECNAT. (2000). Que establece los las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio muestreo y análisis. Diario Oficial De La Federación.

Oliveira, E., y Mayor, M., (2006). Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Universitarios ed. Oviedo, España.

Porta, J., López-Acevedo, M., & M. Poch, R. (2013). Edafología. Uso y protección de suelos. Mundi-Prensa. 608 p.

Rivera Cruz, María del Carmen, & Trujillo Narcía, Antonio (2004). Estudio de toxicidad vegetal en suelos con petróleos nuevo e intemperizado. Interciencia, 29(7),369-376. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/3390940 5

Saval, B.S. (1995). Acciones para le remediación de suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM, México.

Scott, D.F., (2000). Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. Journal of Hydrology. 231-232. 87-104. 10.1016/S0022-1694(00)00186-4.

SEMARNAT. (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México. 2016.

Torres, B. E., J. Cortés B., E. Mejía S., A. Exebio G., A. L. Santos H. y Ma. E. Delgadillo P. (2003). Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca “El Joselito”, Jesús María,

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Jalisco. TERRA Latinoam. 21:117-126.

Vidal, G. (2008). PEMEX, la industria petrolera y el desarrollo económico de México. Retrieved from http://www.cedem.org/~ftpcedem/htdocs/2010/03/PEMEX-la-Inudstria-Petrolera-y-el-Desarrollo-Económico-de-México3.pdf

Viñas, M., & Solanas, A. (2005). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Universitat de Barcelona, 352. http://www.tdx.cesca.es/TDX-0920105-085623/

Wallis, M.G. y Horne, D.J. (1992). Soil water repellency. Advances in Soil Science, 20, 91-146

Wilson, J.J., J. Hatcher y J. S. Goudey. (2002). Ecotoxicological end points for cont aminated site remediation. Annalli dell' Instituto Superiore di Sanitá 38(2):143-147.

Zavala Cruz, J., Gavi Reyes, F., Adams-Schroeder, R. H., Ferrera Cerrato, R., Palma López, D., Vaquera Huerta, H., & Domínguez Ezquivel, J. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el activo cinco presidentes, tabasco, México. 293-302.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

10 ANEXOS

10.1.1 ANEXO A

Durante la colecta de muestras en 2016 después de 2 años de haber aplicado la desorción alcalina y un año de adicionar la enmienda orgánica, se tomaron muestras de algunas zonas aledañas a las celdas de tratamiento, para comparar la evolución de los tratamientos con respecto a las zonas bajo el proceso de atenuación natural. La caracterización de las muestras se presenta en el cuadro 12.

Cuadro 12. Caracterización de los puntos de referencia.

PUNTOS DE REFERENCIA								
ID	**HTP 2016**	**MED10**	**HC (60S)**	**H in situ LHA**	**%HIS/HC**	**Toxicidad**	**pH**	**CE ds m-1**
B67	1133	**NR**	**NR**	4.72	**NR**	0%	7.42	0.05
LLA1	4280	6.75	3.52	1.25	0.36	0%	6.52	0.058
SLGS35S	19206	9.13	2.67	3.04	1.14	20%	6.41	0.029
SLGS35S-D	4517	4.47	1.84	4.93	2.68	0%	5.7	0.058
B67R10W	467	**NR**	**NR**	2.82	**NR**	0%	7.14	0.048
GS1-NC	3344	3.69	1.64	2.63	1.61	0%	7.03	0.035
GS-6R	3382	3.32	2.02	4.48	2.22	0%	6.25	0.051

N.R. (No repelente)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

10.1.2 ANEXO B

La muestra de referencia correspondiente a la celda GS-6 presenta una concentración similar a las muestras AD y ADO en los HTP, mientras que en la GS-7AD la concentración de HTP es ligeramente más elevada con respecto a la muestra de referencia de esta celda. En la muestra GS-1 se puede observar como la concentración de HTP disminuye con respecto al tiempo a través de los procesos de atenuación natural, sin embargo, la concentración de HTP de las muestras tratadas por AD y ADO presentan una mayor reducción en relación al nivel inicial.

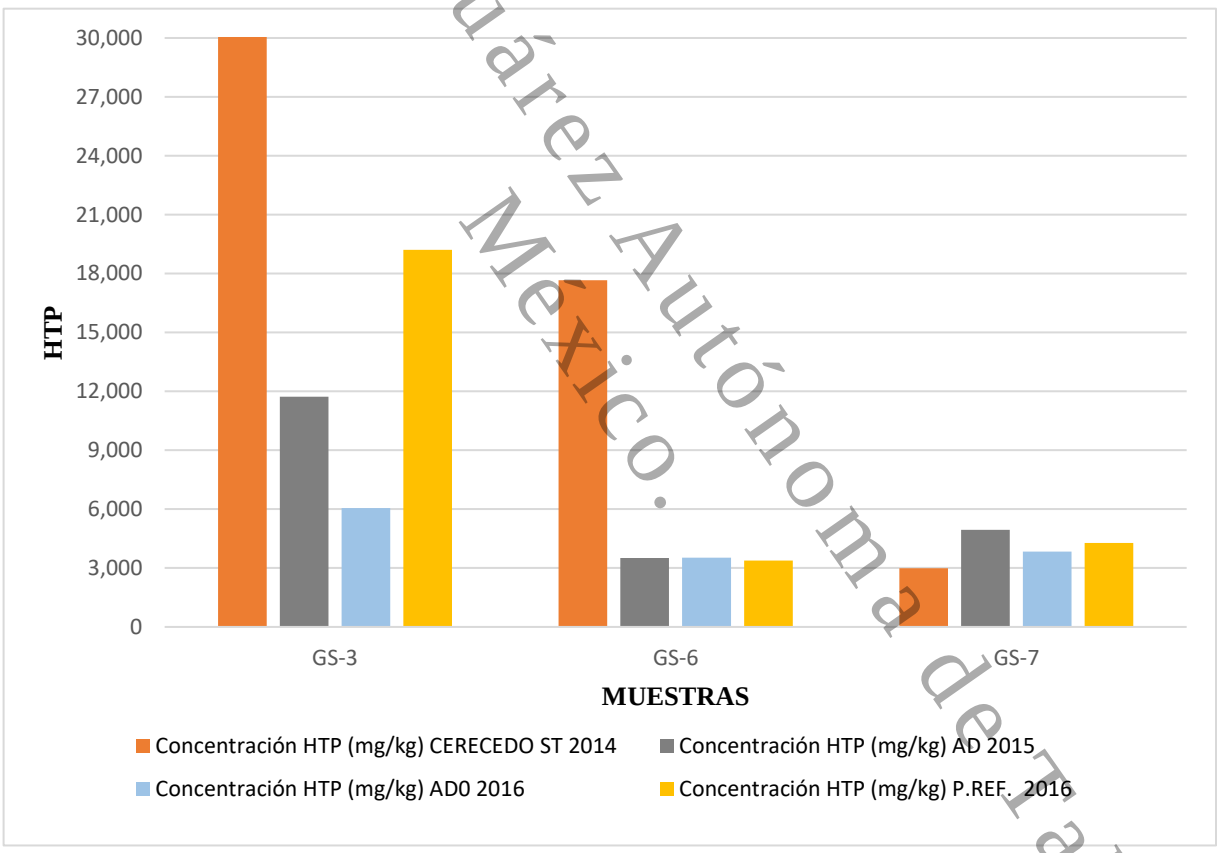

Figura 23. Comparación de la concentración de HTP respecto a los puntos de referencia

10.1.3 ANEXO C

La caracterización del MED10, mostro una severidad mayor en los puntos de referencia con respecto a las muestras tratadas, a pesar de que las concentraciones de hidrocarburo son similares con las muestras GS-6 y GS-7. En general las zonas aledañas presentan una recuperación más lenta bajo los procesos de atenuación natural respecto a las muestras tratadas del sitio.

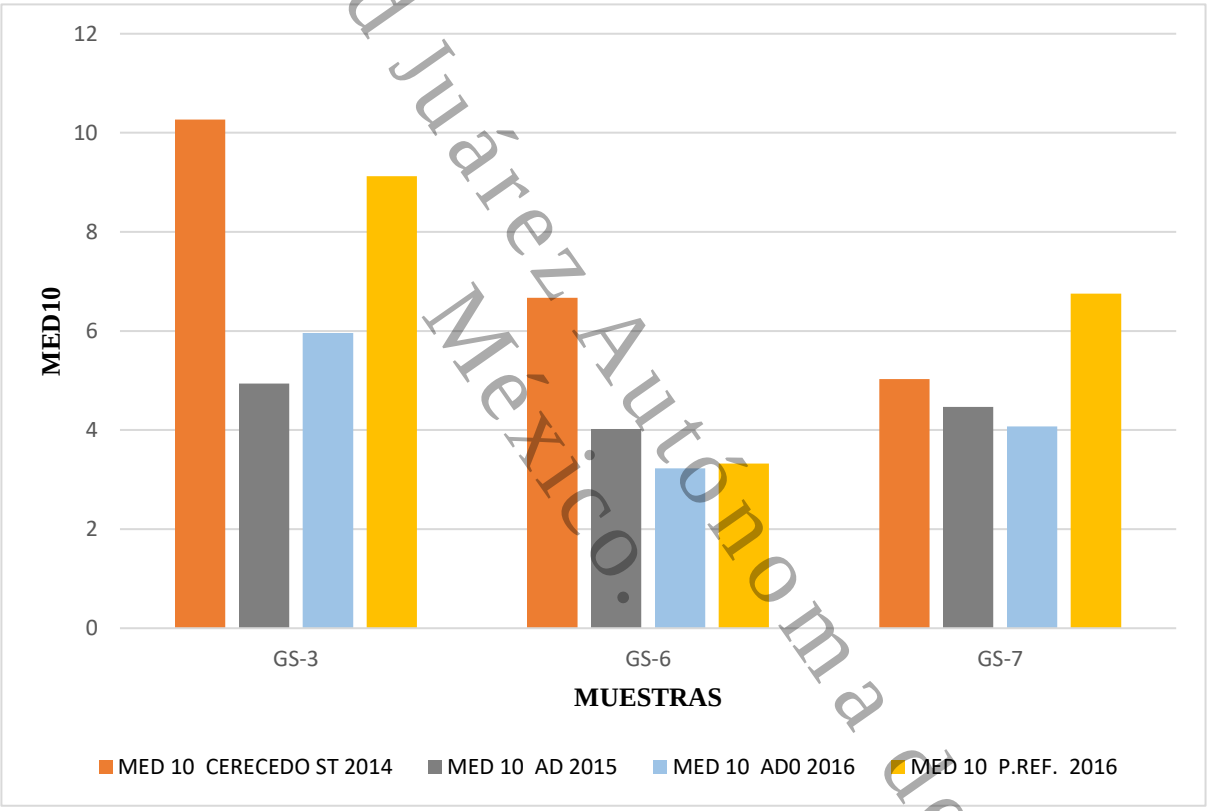

Figura 24. Comparación del MED10 respecto a los puntos de referencia

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

10.1.4 ANEXO D

La relación entre HIS/HC presento un nivel mayor tanto para las muestras tratadas por AD y ADO respecto a los puntos de referencia, sin embargo, se podría esperar que los puntos de referencia aledaños a las muestras GS-3 y GS-6 no presentaran una persistencia alta en la repelencia dado que estas alcanzan una relación >1 entre la humedad *in situ* y la humedad crítica.

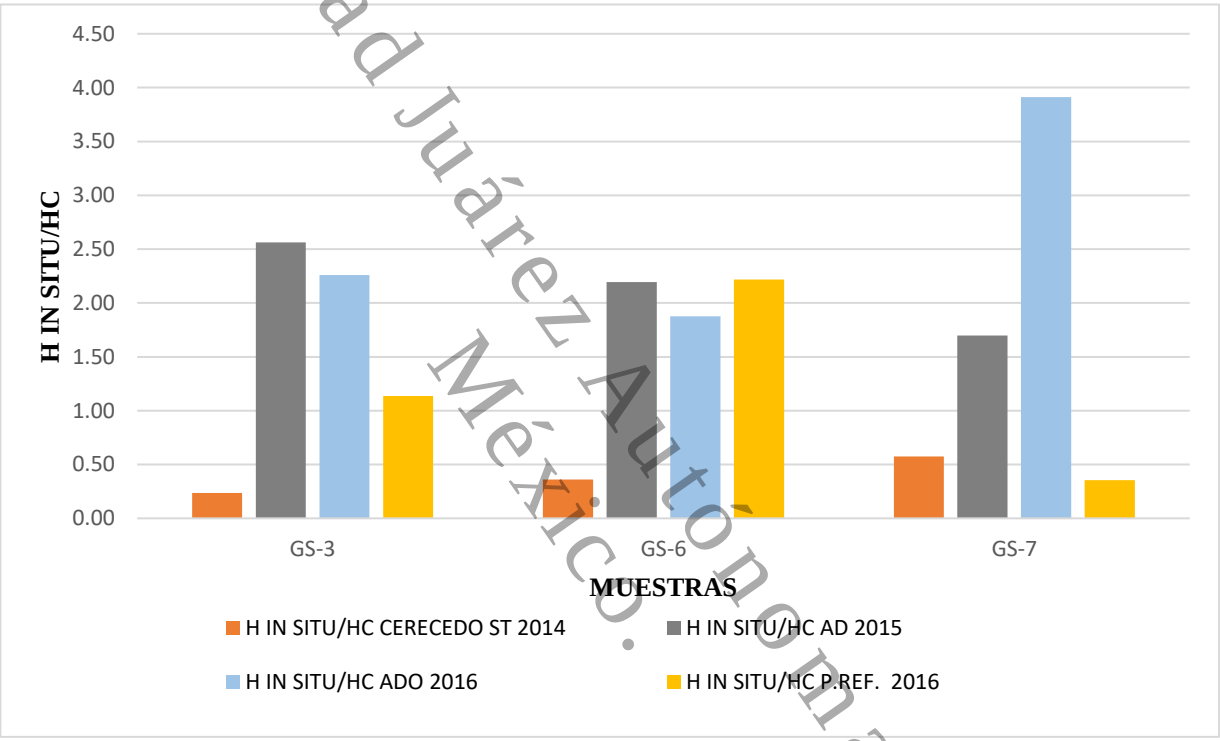

Figura 25. Comparación de la relación HIS/HC de las muestras tratadas con respecto a los puntos de referencia sin tratamiento.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.