



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

División Académica de Ciencias Biológicas



**Dosificación de agentes aglomerantes en la estabilización  
química de recortes de perforación base aceite**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**Maestro en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental**

**(MITyGA)**

Presenta

**Carlos Michel Montejo Sánchez**

Directores

**Dr. Randy Howard Adams Schroeder**

**Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**



**2020  
LEONA VICARIO**

Villahermosa, Tab., a 07 de Octubre de 2020

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. CARLOS MICHEL MONTEJO SÁNCHEZ** egresado de la Maestría en **INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"DOSIFICACIÓN DE AGENTES AGLOMERANTES EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE RECORTES DE PERFORACIÓN BASE ACEITE"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

**A T E N T A M E N T E**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECCIÓN

C.c.p. - Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN



2020  
LEONA VICARIO

OCTUBRE 07 DE 2020

**C. CARLOS MICHEL MONTEJO SÁNCHEZ**  
**PAS. DE LA MAESTRIA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y**  
**GESTIÓN AMBIENTAL**  
**PRESENTE**

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 de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental titulado: **"DOSIFICACIÓN DE AGENTES AGLOMERANTES EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE RECORTES DE PERFORACIÓN BASE ACEITE"**, asesorado por el Dr. Randy Howard Adams Schroeder y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el MIPA. Sergio Ramos Herrera, Dr. Emmanuel Munguía Balvanera, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, MIPA. Liliana Hernández Acosta y M. en C. Marco Antonio Hernández Cobián.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**

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

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706. Fax (993) 354-4308 y 358-1579

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: "**DOSIFICACIÓN DE AGENTES AGLOMERANTES EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE RECORTES DE PERFORACIÓN BASE ACEITE**", 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 este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 07 de octubre del dos mil veinte.

**AUTORIZO**



---

**CARLOS MICHEL MONTEJO SÁNCHEZ**



## Agradecimientos

*A Dios Todopoderoso por darme la fuerza y sabiduría para obtener este prominente título académico.*

*A mi familia que con mucho entusiasmo, valioso apoyo y amor me alentaron a seguir adelante hasta alcanzar la meta.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca No. 721016.*

*A mis directores el Dr. Randy Howard Adams Schroeder y la Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, quienes sin duda alguna y con enormes brazos de enseñanza y aprendizaje me recibieron y dieron la bienvenida al Laboratorio de Remediación, guiándome en paciencia, consejos, ideas y estrategias hasta ser un caso de éxito de esta carrera llamada MITyGA.*

*Al Dr. Raúl Germán Bautista Margulis quien con gran paciencia y calidad humana, me explicó el significado de ser un becario CONACYT y gracias a su consejo decidí adentrarme definitivamente a esta gran aventura denominada MITyGA.*

*A todos los compañeros del Laboratorio de Remediación que contribuyeron con su apoyo y colaboración al cumplimiento de mi tesis, pero en especial a los Maestros y futuros Doctores: Liliana Hernández (por su enorme asesoramiento, enseñanza, gran paciencia y valiosa amistad), Francisco Osorio y Gerónimo Álvarez (por sus consejos, comentarios constructivos y experiencias añadidas a mi persona). Al Mtro. Saúl López (por sus palabras de aliento, experiencias y buenos momentos de conversaciones en el laboratorio). A la Contadora Norma Mendoza (por sus ánimos y buenos deseos a mi persona).*

*A mis compañeros, escuadrón de batalla y soldados de guerra, los MITyGAs: Arcelia, Fátima, Martha y Luis. Sin olvidar, a mi entrañable y gran carnalito Eder Ordoñez.*

*Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas. A él sea la gloria por los siglos. Amén.  
(Reina Valera, 1960, Romanos 11:36).*

## Dedicatoria

*Este logro es dedicado en especial a la memoria de mi Padre el  
Sr. Juan Carlos Montejo Hernández  
(1970- 2017)*

*Quien me brindó todo su apoyo incondicional en mis estudios y así lo hizo cuando obtuve mis dos títulos universitarios de T.S.U. e Ingeniería en Tecnología Ambiental. Y aun después de haber partido de este mundo, él pago todos los requisitos a cumplir para entrar a la carrera de MITyGA, cumpliendo así también su gran promesa hecha en vida.*

*¡Gracias Papá por ser mi mejor y mayor Maestro de vida junto a mi Madre y cumplir tus palabras al dejarme como buena herencia los estudios!...*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>5</b>
3.1 Objetivo general .....	5
3.2 Objetivos específicos .....	5
<b>4. Antecedentes</b> .....	<b>6</b>
4.1 Contexto internacional .....	6
4.2 Contexto nacional .....	8
<b>5. Materiales y Métodos</b> .....	<b>9</b>
5.1 Recolección de material .....	9
5.2 Pre-tratamiento de la muestra .....	10
5.2.1 Secado .....	10
5.2.2 Tamizado .....	11
5.3 Caracterización del material .....	11
5.3.1 Selección del agente aglomerante .....	12
5.4 Preparación de mezclas .....	12
5.4.1 Elaboración del suelo artificial .....	13
5.5 Caracterización de mezclas .....	14
5.5.1 Análisis de HTP en extracto PECT .....	14
5.5.2 Bioensayo de toxicidad aguda .....	15
5.6 Experimentación iterativa .....	16
5.6.1 Tratamiento de estabilización química .....	18
5.7 Caracterización de los tratamientos de EQ .....	18

<b>6. Resultados y discusión</b> .....	<b>19</b>
6.1 Caracterización del material .....	19
6.1.1 Selección del agente aglomerante.....	20
6.2 Elaboración del suelo artificial .....	21
6.3 Caracterización de mezclas.....	21
6.3.1 Análisis de HTP en extracto PECT. ....	21
6.3.2 Bioensayo de toxicidad aguda.....	22
6.4 Experimentación iterativa y aplicación de tratamientos de EQ.....	23
6.4.1 Iteración 1.....	23
6.4.2 Iteración 2.....	24
6.4.3 Iteración 3.....	26
6.4.4 Iteración 4.....	28
<b>7. Conclusiones</b> .....	<b>31</b>
<b>8. Recomendaciones</b> .....	<b>32</b>
<b>9. Referencias</b> .....	<b>33</b>



## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Vista satelital y frontal de la planta de tratamiento. ....	9
<b>Figura 2.</b> a) homogenizado del material y b) piedras, hojarasca, astillas de madera en el material. ...	10
<b>Figura 3.</b> Material colocado en la celda de tratamiento. ....	10
<b>Figura 4.</b> a) molienda del recorte, b) material tamizado.....	11
<b>Figura 5.</b> Mezclas preparadas y almacenadas en recipientes de 3.78 L.....	13
<b>Figura 6.</b> Gráfica de los porcentajes de aceite recuperado agregados al RPBA.....	13
<b>Figura 7.</b> Proceso de la experimentación iterativa. ....	17
<b>Figura 8.</b> Resultado final de la prueba preliminar con a) hidróxido de calcio y b) CP. ....	20
<b>Figura 9.</b> Gráfica de HTP lixiviables de las mezclas sin tratamiento. ....	21
<b>Figura 10.</b> Efectos tóxicos presentados en los organismos: a) Seco (10% HTP), b) expulsión de sangre (14% HTP), c) expulsión de líquido celómico (18% HTP) y d) sanos (100% de testigos).....	23
<b>Figura 11.</b> Porcentaje de reducción de lixivios de la primera iteración.....	24
<b>Figura 12.</b> Gráfica de comparación de HTP lixiviables de las UET sin tratamiento, 1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> iteración. 25	
<b>Figura 13.</b> Gráfica de HTP lixiviables de la mezcla de 10% sin tratamiento, 1 <sup>er</sup> , 2 <sup>da</sup> y 3 <sup>ra</sup> iteración. ....	27

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros usados para la caracterización del material.....	11
<b>Tabla 2.</b> Composiciones de los suelos usados para el suelo artificial.....	14
<b>Tabla 3.</b> Criterios propuestos en el proyecto. ....	18
<b>Tabla 4.</b> Caracterización del aceite recuperado. ....	19
<b>Tabla 5.</b> Caracterización del RPBA. ....	19
<b>Tabla 6.</b> Cálculos para la elaboración del SA.....	21
<b>Tabla 7.</b> Resultados del análisis de toxicidad aguda de las mezclas sin tratamiento.....	22
<b>Tabla 8.</b> Tratamientos de EQ aplicados en la 1 <sup>ra</sup> iteración.....	23
<b>Tabla 9.</b> Tratamientos de EQ aplicados en la 2 <sup>da</sup> iteración. ....	25
<b>Tabla 10.</b> Tratamientos de EQ aplicados en la 3 <sup>ra</sup> iteración.....	26
<b>Tabla 11.</b> Tratamientos de EQ aplicados en la 4 <sup>ta</sup> iteración.....	28
<b>Tabla 12.</b> Resultados del cálculo del límite máximo permisible en lixiviados con datos de la 1 <sup>er</sup> iteración. .....	30

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Resumen

El tratamiento de los recortes de perforación base aceite (RPBA) es un problema debido a las cantidades generadas y su contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos. No obstante, una solución efectiva y económica puede ser el tratamiento de Estabilización Química (EQ) donde los contaminantes de los residuos o suelos contaminados son inmovilizados a través de la adición de aglomerantes para convertirlos en productos menos tóxicos y solubles. Además, en este sexenio (2019-2024) se proyecta duplicar la producción petrolera; lo que significa, que habrá más pozos perforados y una mayor generación de RPBA. Sin embargo, debido a la falta de estudios y trabajos publicados sobre la EQ aplicada en RPBA, es necesario la realización de una investigación experimental basada en pruebas de laboratorio para establecer una relación entre la concentración de hidrocarburos en el RPBA y la dosificación óptima de reactivo aplicable para conseguir resultados que cumplan con los criterios ambientales deseados. Por lo tanto, es clara la existencia de una necesidad social y laguna técnica sobre cómo tratar este tipo de residuo de manejo especial de manera ambiental y económica. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue identificar la dosificación de agentes aglomerantes en el tratamiento de recortes de perforación base aceite por estabilización química. Para esto, se caracterizó una muestra de aceite recuperado y los RPBA con base en los parámetros físico-químicos grados API por los métodos de la ASTM D287-12b y Morales et al., 2013; conductividad eléctrica, densidad aparente y real, humedad, pH y textura conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000; hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en extracto PECT según la NOM-053-SEMARNAT-1993 y EPA 418.1; así como el bioensayo de toxicidad aguda por el método de contacto con papel filtro de la OECD 1984 en el extracto PECT. Luego de esto, se prepararon cinco lotes a diferentes concentraciones de aceite-recorte. Lo cual, consistió en añadir la proporción de aceite recuperado necesaria para obtener mezclas al 10, 12, 14, 16 y 18% de HTP con el propósito de representar los RPBA más típicos en la industria. Posteriormente, se aplicaron tres tratamientos iterativos de EQ mediante la dosificación de diferentes porcentajes de hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$ . Después de 28 días de curado, los tratamientos se analizaron para la identificación de las mejores dosificaciones que cumplieran con los criterios propuestos de HTP lixiviables ( $\leq 5 \text{ mg/L}_{PECT}$ ) y toxicidad aguda ( $\leq 10\%$  de mortalidad, sin efectos graves). Finalmente, en este estudio los resultados mostraron que las mezclas sin tratamiento no presentaron toxicidad aguda para los organismos de prueba *Eisenia foetida*. La mejor relación de HTP lixiviados-dosis de hidróxido de calcio, se obtuvo en la primera iteración (8.5, 9.8, 11, 12.5 y 14% de cal hidratada). Asimismo, el tratamiento de EQ tuvo límites físicos a causa del alto porcentaje de arena en el material (55%) y químicos por la falta de una fuente rica en sílice y alúmina para un mayor secuestro de HTP. Además, se logró parcialmente el cumplimiento de los criterios propuestos y desde un marco de referencia técnico-normativo los resultados de la primera iteración cumplen con los LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y NOM-143-SEMARNAT-2003. Por lo tanto, el material tratado podría ser reciclado para el relleno y nivelación de suelos con uso industrial según lo indicado en el artículo 60 del Reglamento de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Tabasco.

*Palabras claves:* estabilización química, hidróxido de calcio, recortes de perforación, hidrocarburos, toxicidad aguda.

## Abstract

Treatment of oil-based drill cuttings (OBDC) is a problem due to the amounts generated and their content of organic and inorganic contaminants. Nevertheless, an effective and economic solution can be Chemical Stabilization treatment (CS), where contaminants from waste or contaminated soils are immobilized through the addition of binders to convert them into less toxic and soluble products. In addition, in this six-year term (2019-2024) it is projected to double oil production, which means there will be more wells drilled and more OBDC generation. However, due to the lack of studies and published works on chemical stabilization for oil-based drilling cuttings, an experimental laboratory research is required to establish a relationship between the concentration of hydrocarbons in the OBDC and the optimal dose of applicable reagent to achieve results that meet the desired environmental criteria. Therefore, the existence of a social need and the technical gap on how to treat this type of special waste in an environmental and economic way is clear. Therefore, the objective of this work was to identify the dosage of binding agents in the chemical stabilization treatment of OBDC. For this, a sample of recovered oil and the OBDCs were characterized based on the physical-chemical parameters API degree by the methods of ASTM D287-12b and Morales et al., 2013; electrical conductivity, apparent and real density, humidity, pH and texture according to NOM-021-SEMARNAT-2000; total petroleum hydrocarbons (TPH) in PECT (TCLP - equivalent) extract according to NOM-053-SEMARNAT-1993 and EPA 418.1; as well as the acute toxicity bioassay by the OECD 1984 filter paper contact method in the PECT extract. Subsequently, five batches were prepared at different concentrations of recovered oil/drilling cuttings. This consisted of adding the proportion of recovered oil necessary to obtain mixtures of 10, 12, 14, 16 and 18% TPH in order to represent the most typical OBDC in the industry. Subsequently, three iterative CS treatments were applied by dosing different percentages of calcium hydroxide [Ca(OH)<sub>2</sub>]. After 28 days of curing, treatments were analyzed to identify the best doses that met the proposed criteria for leachable TPHs ( $\leq 5 \text{ mg/L}_{\text{PECT}}$ ) and acute toxicity ( $\leq 10\%$  mortality, without serious effects). Finally, in this study the results showed that the untreated mixtures did not present acute toxicity for the test organisms, *Eisenia foetida*. The best ratio of leachate TPH-calcium hydroxide dose was obtained in the first iteration (8.5, 9.8, 11, 12.5 and 14% hydrated lime). Likewise, the CS treatment had physical limits due to the high percentage of sand in the material (55%) and chemical limitations due to the lack of a rich source of silica and alumina for further TPH sequestration. In addition, compliance with the proposed criteria was partially achieved and from a technical-regulatory framework the results of the first iteration comply with the maximum limits allowed established in NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 and NOM-143-SEMARNAT-2003. Therefore, the treated material could be recycled for the filling and leveling of soils with industrial use as indicated in article 60 of the Regulation of the Law for the Prevention and Integral Management of Waste of the State of Tabasco.

**Keywords:** chemical stabilization, calcium hydroxide, drilling cuttings, hydrocarbons, acute toxicity.



## 1. Introducción

Durante la perforación de un pozo petrolero se emplean fluidos de perforación, que actúan como vehículo para transportar el recorte desde el subsuelo hacia la superficie (Rasso, 1999). El tratamiento de los recortes de perforación base aceite (RPBA) es un problema debido a las cantidades generadas y su contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los RPBA son más dañinos para el ambiente debido su contenido de diesel/aceite mineral. Por lo tanto, existe la necesidad de tratamientos efectivos (Leonard y Stegemann, 2010) para su adecuada disposición final.

En México, no se cuenta con una normatividad ambientalmente eficiente en el manejo y tratamiento adecuado de los RPBA (SEMARNAT, 2006). Además, en el estado de Tabasco existen empresas autorizadas para el tratamiento de recortes de perforación cuyos procesos son biológicos, físicos y térmicos; los cuales, presentan desventajas económicas, materiales y técnicas. En el caso de los procesos térmicos, se presentan emisiones a la atmósfera y un alto consumo de energía, los físicos pueden presentar riesgos para el ambiente al transferir contaminantes de una matriz a otra (ej. generación aguas residuales) y los biológicos pueden alcanzar una degradación incompleta de los hidrocarburos (Kogbara, Ayotamuno, Onuomah, Ehio y Damka, 2016).

Una solución efectiva, rápida y económica puede ser el tratamiento por Estabilización Química (EQ) cuyas ventajas incluyen el uso mínimo de energía, emisiones atmosféricas casi nulas y los agentes aglomerantes utilizados son disponibles y económicos (Tuncan, Tuncan y Koyuncu, 2000; Al-Ansary y Al-Tabbaa, 2007).

De igual forma, el tratamiento de EQ es catalogado como Mejor Tecnología Disponible Demostrada (BDAT; por sus siglas en inglés) según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, porque es una tecnología estable y aplicada en el 25% de los sitios del programa Superfondo (EPA, 2007). La EQ, es la inmovilización de contaminantes en residuos o suelos contaminados a través de la adición de aglomerantes para convertirlos en productos menos tóxicos y solubles (Ball, Sterwart y Schliephake, 2012; EPA, 2017).

La estabilización química es un proceso de reacción puzolánica, el cual es causado por el rápido aumento del pH ( $> 10$ ) del suelo o material semejante, cuando se añaden las cantidades



adecuadas de cal y agua, se permite disolver las partículas de arcilla para liberar la sílice y la alúmina que reaccionan con el calcio de la cal para formar matrices cristalinas de Silicatos de Calcio Hidratados (S-C-H) y Aluminatos de Calcio Hidratados (A-C-H), donde los contaminantes son secuestrados o estabilizados (Méndez-López, 2008a; Álvarez-Coronel, 2010).

Hoy en día, debido a la falta de estudios y trabajos publicados sobre la estabilización química en recortes de perforación base aceite, es pertinente realizar una investigación experimental basada en pruebas de laboratorio para determinar la cantidad adecuada de aglomerantes a utilizar (Al-Ansary y Al-Tabbaa, 2007; Ladu, Demetry, Athiba y Lako, 2018). Así como, el establecer una relación entre la concentración de hidrocarburos en el recorte de perforación y la dosificación óptima de reactivo aplicable. Aunado a esto, en este sexenio (2019-2024) se pretende duplicar la producción petrolera; lo que significa, más pozos perforados y mayor generación de recortes de perforación base aceite. Por lo tanto, existe una necesidad social y una laguna técnica de cómo tratar este tipo de residuo de manejo especial de manera efectiva y económica.

En este trabajo se muestran los hallazgos encontrados sobre la dosificación de agentes aglomerantes en el tratamiento de estabilización química de recortes de perforación base aceite.



## 2. Justificación

En los últimos años, el crecimiento de la industria petrolera ha generado grandes volúmenes de recortes de perforación (SEMARNAT, 2006). En el contexto internacional, la plataforma continental del Reino Unido produce cada año más de 80,000 toneladas de recortes base aceite en alta mar (Huang et al., 2018). En los Estados Unidos, solamente en los pozos de tierra se generan alrededor de 150 millones de barriles de residuos de perforación según el Instituto Americano del Petróleo (API) (Ismail, Alias, Sulaiman, Jaafar y Ismail, 2017). En México, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reportó que durante el sexenio 2006-2012, generó un total de 1,029,380 toneladas de recortes base aceite (SEMARNAT, 2012). Aunado a esto, en su informe de sustentabilidad de 2018, mencionó que en 2017 se dispusieron 50,800 toneladas de recortes, derivados de las actividades de exploración y perforación, lo cual constituyó el 100% del volumen generado (SEMARNAT, 2020). Asimismo, en el estado de Tabasco para el año 2008, 334 mil toneladas de recortes de perforación fueron generados tan solo en el activo integral Samaria-Luna (Méndez et al., 2013).

También, en línea con la nueva visión estratégica del Gobierno de México plasmado en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 para el sector energético nacional, PEMEX planteó en su Plan de Negocios 2019-2023; incrementar su producción de 175 a 337 Mbd (Miles de barriles diarios) a partir del presente año hasta el 2023 (PEMEX, 2019). Lo que significa, que habrá más pozos perforados y una mayor generación de RPBA.

El manejo de los recortes de perforación plantea un problema para la industria del petróleo debido a las cantidades generadas de recortes y su contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, una solución efectiva, rápida y económica puede ser el tratamiento por Estabilización Química (EQ) cuyas ventajas incluyen el uso mínimo de energía, emisiones atmosféricas casi nulas y los agentes aglomerantes utilizados son disponibles y económicos (Tuncan, Tuncan y Koyuncu, 2000; Al-Ansary y Al-Tabbaa, 2007).

Actualmente, debido a la falta de estudios y trabajos publicados sobre tratamientos de EQ en RPBA, es pertinente realizar una investigación experimental basada en pruebas de laboratorio para establecer una relación entre la concentración de hidrocarburos en el RPBA y la dosificación óptima de reactivo aplicable y de esta manera, conseguir resultados que cumplan con los criterios ambientales deseados (Al-Ansary y Al-Tabbaa, 2007; Ladu et al., 2018).





Por lo tanto, es clara la existencia de una necesidad social y laguna técnica de cómo tratar este tipo de residuo de manejo especial de forma segura, ambiental, efectiva y económica. Por consiguiente, este trabajo contribuye en el desarrollo de estrategias para la dosificación de agentes aglomerantes en el tratamiento de estabilización química de recortes de perforación base aceite. Generando así, beneficios como:

- Contribuir en el llenado de un vacío técnico-ambiental en el manejo de los recortes de perforación.
- Mayor control y eficiencia en el tratamiento de estabilización química en recortes de perforación.
- Reducir gastos económicos en la compra excesiva de reactivos usados para el tratamiento de recortes.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Identificar la dosificación efectiva de agentes aglomerantes en el tratamiento de estabilización química de recortes de perforación base aceite en Tabasco.

#### 3.2 Objetivos específicos

Conocer las características del recorte de perforación base aceite “típico” y el aceite recuperado del mismo, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos en laboratorio.

Seleccionar los aglomerantes a evaluar, con base en pruebas preliminares, basadas en observaciones organolépticas.

Medir el efecto de dosificaciones de hidróxido de calcio en mezclas con diferentes concentraciones de hidrocarburo, mediante HTP en extracto PECT y toxicidad aguda.

Definir los mejores tratamientos con dosificación óptima a través de la disminución en HTP lixiviables y toxicidad aguda.



## 4. Antecedentes

### 4.1 Contexto internacional

Desde un contexto internacional, el origen de muchos sistemas modernos de EQ provienen del campo de la Solidificación/Estabilización (S/E) de residuos nucleares radiactivos. Mientras que los residuos radiactivos empezaron a generarse con la puesta en marcha del Proyecto Manhattan en 1942, se prestó poca atención a su tratamiento y eliminación durante y poco después de la Segunda Guerra Mundial. A medida que la industria nuclear en tiempos de paz comenzó a desarrollarse, pronto reconoció la necesidad de solidificar los residuos nucleares en tambores y otros contenedores antes de que estos pudieran enviarse o enterrarse en los sitios de eliminación controlados por el gobierno en los EE. UU. (Cornner y Hoeffner, 1998a).

Más tarde, los operadores de estos sistemas descubrieron que era posible incorporar otros tipos de residuos, como los lodos aceitosos de la refinación de petróleo, en los sistemas de cal/cenizas volantes y aún producir un sólido con propiedades físicas razonables. A fines de la década de 1960, al menos una empresa, Chemfix, Inc., comenzó a buscar formas de tratar el lodo económicamente. En el proceso, se descubrió y patentó un método basado en la combinación de silicatos solubles y agentes de fijación (silicato de sodio y cemento Portland). Esta empresa, basó su negocio en un servicio móvil donde las unidades de tratamiento podían llevarse al sitio, establecerse, tratar en cuestión de días, semanas o meses, y luego trasladarse al siguiente sitio. Después, el proceso se amplió para incluir lodos que contenían compuestos orgánicos, en la industria química, en lodos biológicos y diversos residuos mixtos. Tan solo esta compañía, solidificó más de 100 millones de galones de lodos entre 1970 y 1976. A principios de la década de 1990, el proceso Chemfix, se utilizó para tratar aproximadamente 500 000 000 galones ( $1\ 892\ 705.8\ m^3$ ) de residuos líquidos industriales y municipales. Utilizando, unidades de tratamiento móviles. Los lodos de perforación fueron tratados en instalaciones fijas (Cornner y Hoeffner, 1998a, 1998b).

Tuncan et al. (2000) realizaron un tratamiento de S/E en residuos de perforación contaminados con 4% de petróleo; aplicando cenizas puzolánicas, hidróxido de calcio y cemento para reciclar el recorte de perforación como sub-base en la construcción de carreteras. Ellos, encontraron que el mejor resultado, se obtuvo en la dosificación del 20% de hidróxido de calcio, 10% de



cenizas y 5% de cemento; reduciendo la concentración de hidrocarburo a 1%, y asegurando que el recorte tratado se podría usar de manera efectiva y segura como material de sub-base.

Knop, Cruz, Heineck y Consoli (2005), analizaron la eficiencia del método de Solidificación/Estabilización (S/E) en el tratamiento de un suelo del sur de Brasil, contaminado con gasóleo a través de la adición de cemento Portland como reactivo a escala laboratorio. Mientras que, en la prueba de lixiviados el suelo se contaminó con sólo un 10 y 40% de gasóleo. Se aplicaron dosis de 10 y 20% de reactivo por cada muestra contaminada, y concluyeron que la S/E es más eficiente para concentraciones pequeñas de hidrocarburos, mientras que para concentraciones altas, una parte se libera indistintamente de la cantidad de reactivo aplicado.

Khodja, Canselier, Dali, Hafid y Ouahab (2008) utilizaron cemento, polímero de silicato y agua como químicos para el tratamiento de Solidificación/Estabilización en 20 muestras de recortes de perforación base aceite procedentes de los campos Hassi Messaoud (HMD) y Hassi R'Mel (HR) al sur de Argelia. El tratamiento de S/E, redujó las concentraciones iniciales de hidrocarburos en los lixiviados de los recortes de perforación de 26 mg kg<sup>-1</sup> de HMD y 3 mg kg<sup>-1</sup> de HR a 1-1.6 mg kg<sup>-1</sup> y 0.4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Leonard y Stegemann (2009) aplicaron un tratamiento de Solidificación/Estabilización en recortes de perforación con concentración de 66,700 mg kg<sup>-1</sup> base seca en donde el 4.4 % eran hidrocarburos alifáticos; estos, fueron tratados con la adición de cemento Portland (CEM I) y cenizas volantes de plantas de alto contenido de carbono (HCPA; por sus siglas en inglés) como un nuevo absorbente para contaminantes orgánicos. El experimento tuvo un tiempo de curado de 7, 28 y 56 días. Los resultados demostraron, que el recorte tratado tenía potencial para ser reciclado como material para rellenos, rellenos estructurales, pavimento (bases, sub-bases y sub-grados), camas de conductos y en trabajos de control de erosión y recuperación de puentes.

Kogbara et al. (2016) desarrollaron un tratamiento combinado de bioaugmentación y S/E en recortes base aceite (~ 3,769 mg kg<sup>-1</sup>); usando como aditivo el cemento Portland en una dosificación del 30%. Después de 28 días de curado, la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH; por sus siglas en inglés) se redujó en un rango del 84 al 99%.



## 4.2 Contexto nacional

Guzmán-Osorio (2005) estudió tres métodos de tratamiento para la remediación de suelos de los alrededores de una presa artificial que previamente colectaba el efluente ácido mezclado con hidrocarburos de una mina de azufre en el sur del estado de Veracruz. Los tres métodos fueron, bioestimulación, bioaugmentación con microorganismos autóctonos y un proceso de Estabilización Química-Biológica. Siendo la Estabilización Química-Biológica el método más factible para la remediación, aplicando 4% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y 4% de acondicionador orgánico (cachaza de caña) además de eliminar completamente la toxicidad aguda.

Méndez-López (2008b) realizó un estudio de factibilidad sobre el uso de suelo altamente contaminado con hidrocarburos de la presa agua de mina, Unidad Minera Texistepec, Veracruz, como sub-base en la construcción de caminos, y encontró que las concentraciones con las que se obtuvieron menores lixiviados fueron con 6% de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y 1% de tierra diatomea como fuente de sílice.

Álvarez-Coronel (2010) realizó pruebas de Estabilización/Solidificación en un material contaminado con 60% de costra aceitosa y 40% de sedimento. Determinó los hidrocarburos en lixiviado, toxicidad y resistencia a la compresión. Las concentraciones de aglomerante y puzolana probadas fueron 3.75–15% de  $\text{CaO}$  y 1.25–5.0% de tierra diatomea. En todos los tratamientos de estabilización la toxicidad aguda resultó nula o indeterminada. La estabilización fue factible para este sitio usando concentraciones bajas de reactivos (3.75%  $\text{CaO}$  y 1.25% tierra diatomea).

Soberano-Álvarez (2014) evaluó el proceso de Neutralización/Solidificación para el tratamiento integral de residuos de terracería ácida y sedimentos contaminados con hidrocarburos intemperizados. En el proceso integrado, la terracería ácida fue combinada con los sedimentos contaminados y la mezcla fue homogenizada completamente antes de agregar los reactivos (5.15% de  $\text{CaO}$  y 1.25% de tierra diatomea). Al finalizar la fase experimental, la toxicidad aguda estuvo por debajo del nivel umbral y la concentración de hidrocarburos lixiviables fue de 22.63  $\text{mg kg}^{-1}$ .

## 5. Materiales y Métodos

### 5.1 Recolección de material

El material utilizado en este trabajo fue obtenido de la planta de tratamiento Bienes Sustentables, S.A. de C.V. (Figura 1) ubicado en el Ejido Veintiuno de Marzo, Buena Vista Río Nuevo 1ra. Sección, Villahermosa, Tabasco.

Se recolectaron aproximadamente 160 L de recorte de perforación base aceite y 40 L de aceite recuperado. Los cuales fueron transportados en 10 recipientes de plástico con tapa hermética con capacidad de 20 L. El material fue recolectado al interior del área de tratamiento por el mismo personal de la planta, bajo el criterio de material “típico”; es decir, que visualmente tuviera el aspecto de los recortes que comúnmente recibían.

El material fue trasladado en camioneta desde la empresa hasta las instalaciones del Laboratorio de Remediación en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) donde se desarrolló el estudio.



**Figura 1.** Vista satelital y frontal de la planta de tratamiento.



## 5.2 Pre-tratamiento de la muestra

### 5.2.1 Secado.

El material fue extendido sobre una lona de polietileno impermeable de 5 x 7 m y homogenizado manualmente con una pala de acero inoxidable para reducir su alto contenido de humedad. Asimismo, fueron retirados de forma manual objetos como: piedras, astillas de madera, hojarasca y trozos de geomembrana (Figura 2). Posteriormente, el recorte de perforación fue colocado a la intemperie en una celda de tratamiento, ubicado a un costado del Laboratorio H de la DACBiol-UJAT (Figura 3). La homogenización, se realizó diariamente hasta alcanzar el mayor secado posible.



Figura 2. a) homogenizado del material y b) piedras, hojarasca, astillas de madera en el material.



Figura 3. Material colocado en la celda de tratamiento.



### 5.2.2 Tamizado.

Una vez secado el material, fue molido y tamizado mediante el uso de un molino manual para su trituración. Luego, fue pasado a través de un tamiz de acero inoxidable No. 16 de 1.19 mm de abertura (Figura 4). Se tamizaron 20 kg de recorte de perforación como reserva para su posterior caracterización.



Figura 4. a) molienda del recorte, b) material tamizado.

### 5.3 Caracterización del material

Parámetros y métodos evaluados al material y al aceite recuperado (solo °API).

Tabla 1. Parámetros usados para la caracterización del material.

Parámetro	Método	Equipo
°API	ASTM D287-12b; Morales et al., 2013	Termohidrómetro
CE	NOM-021-SEMARNAT-2000	Medidor multiparamétrico HI98195-Hanna
Densidad Aparente	NOM-021-SEMARNAT-2000	Balanza analítica BJ 2200C-Precisa
Densidad Real	Muñoz et al., 2013	Balanza analítica BJ 2200C-Precisa
HTP en extracto PECT	NOM-053-SEMARNAT-1993; EPA 418.1	TOG/TPH Analyzer-Infracal
Humedad	Térmico	Termobalanza OHAUS MB35
pH	NOM-021-SEMARNAT-2000	Medidor multiparamétrico HI98195-Hanna
Textura	NOM-021-SEMARNAT-2000	Hidrómetro Bouyoucos
Toxicidad aguda	Contacto con papel filtro OECD, 1984	Balanza analítica BJ 2200C-Precisa



### 5.3.1 Selección del agente aglomerante.

Se realizó una prueba preliminar de dos agentes aglomerantes para la estabilización química del RPBA. Los reactivos fueron hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) y cemento Portland (CP). La prueba consistió en la dosificación de 4% de cal hidratada y 5.3% de CP en dos muestras de RPBA tamizados de 300 g cada uno. Después del pesaje, los agentes fueron agregados en base seca y se homogenizaron con el uso de una cuchara de acero inoxidable. Luego, de forma controlada se vertió agua utilizando una probeta de vidrio de 250 mL hasta alcanzar una consistencia de pasta saturada (sin exceso de agua). Posteriormente, cada prueba fue mezclada hasta alcanzar un aspecto homogéneo y el tiempo que duró este proceso fue medido con un cronómetro.

Las dosificaciones de hidróxido de calcio y cemento Portland aplicadas, se basaron en trabajos realizados anteriormente en el Laboratorio de Remediación (Guzmán-Osorio, 2005; Méndez-López, 2008b; Álvarez-Coronel; 2010; Soberano-Álvarez, 2014). Es importante, mencionar que el CP es una fuente rica en sílice; ya que tiene integrado aglomerante/puzolana en una proporción (3:1). Por lo tanto, las dosis de cal anhidra en ambos agentes fueron proporcionales.

### 5.4 Preparación de mezclas

Se elaboraron cinco lotes a diferentes concentraciones de aceite/recorte. Este proceso consistió en añadir la proporción de aceite recuperado necesario para obtener mezclas al 10, 12, 14, 16 y 18% de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) con el propósito de representar aquellos RPBA más comunes en la industria (Figura 5). El tamaño final de cada lote fue de tres kilogramos. La incorporación del aceite en el RPBA, se hizo de forma manual usando guantes de nitrilo y con un tiempo de homogenizado de 10 minutos. En la siguiente Figura 6, se muestra gráficamente el porcentaje de aceite recuperado (% p/p) añadido al RPBA.



Figura 5. Mezclas preparadas y almacenadas en recipientes de 3.78 L.

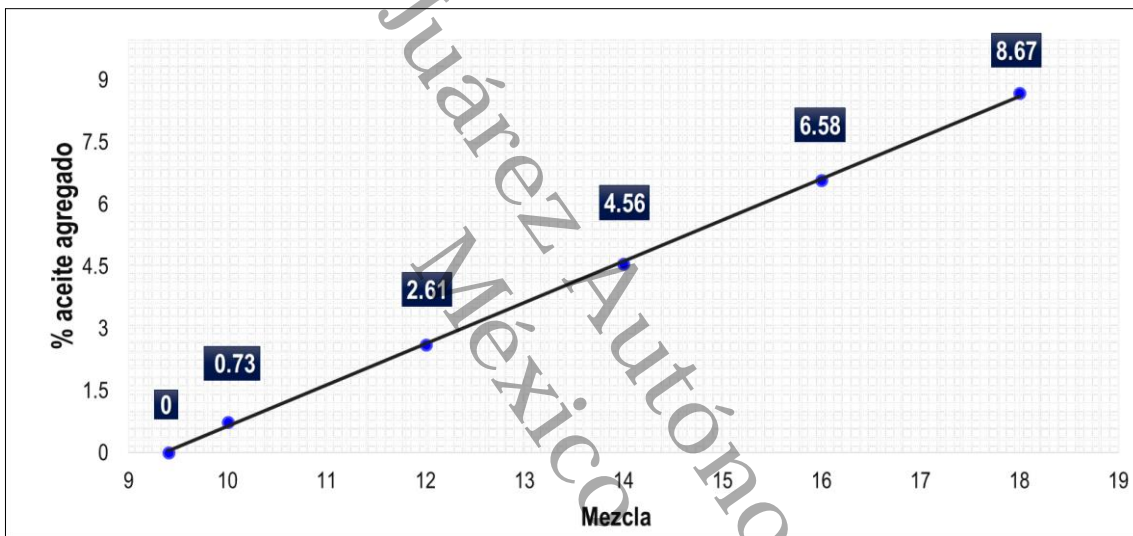


Figura 6. Gráfica de los porcentajes de aceite recuperado agregados al RPBA.

#### 5.4.1 Elaboración del suelo artificial.

A causa de que el RPBA no es un suelo natural, sino un material de características geológicas semejantes, fue necesario, la elaboración de un suelo testigo para comparar los posibles efectos tóxicos del material inicial y tratado contra un suelo no contaminado (artificial) que fuera de características similares en textura (partículas de arena, limo y arcilla) que el RPBA en estudio.

En la siguiente Tabla 2, se muestran las composiciones de los suelos naturales utilizados para la elaboración del suelo artificial (SA).



**Tabla 2.** Composiciones de los suelos usados para el suelo artificial.

Composición	Arenosol (%)	Fluvisol (%)	Vertisol (%)	Total (%)
arena	87.3	6.8	0.7	94.8
limo	3.7	34.4	39.3	77.4
arcilla	9	58.8	60	127.8
Total	100	100	100	300

## 5.5 Caracterización de mezclas

Las mezclas preparadas fueron caracterizadas por los parámetros de HTP en extracto PECT (NOM-053-SEMARNAT-1993; EPA 418.1) y Toxicidad aguda (Contacto con papel filtro OECD, 1984).

### 5.5.1 Análisis de HTP en extracto PECT.

El procedimiento para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en lixiviados, se realizó usando la Prueba de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT) según la Norma Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 (equivalente al método EPA 1311-TCLP, Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Primero se preparó el reactivo de extracción 1, al añadir 5.7 mL de ácido acético glacial en 500 mL de agua desionizada o desmineralizada, se añadió 64.3 mL de NaOH 1 N y se aforó a un litro. Cuando se prepara en forma correcta el pH de este reactivo es de  $4.93 \pm 0.05$  (extracto PECT). Luego, se pesó 10 g de suelo en un matraz de Erlenmeyer de 250 mL y lentamente se vertieron 200 mL del reactivo de extracción 1 (esto se repitió con cada muestra). Después, se cerró herméticamente el matraz con cinta teflón para asegurar un mejor sellado. Luego, se colocó el matraz en el equipo de agitación rotatoria a 180 rpm durante  $18 \pm 2$  horas. Pasado este tiempo, se filtró con un papel Whatman #42, el componente líquido del sólido, extrayendo 200 mL de solución del matraz y se procedió a determinar los HTP presentes en el extracto PECT. Se utilizó el método EPA 418.1 (Petroleum Hydrocarbons Spectrophotometric Infrared), modificado para suelos y sedimentos. Este método es equivalente al método de la norma mexicana NMX-AA-117-SCFI-2001, Determinación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP's) en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas (SCFI, 2001). Se colocaron 100 mL de solución extraída en el embudo de separación, se añadieron 35 mL de Diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) y se agitó vigorosamente durante 5 min, permitiendo que las capas se separaran y la capa de solvente



contenida en el inferior del embudo se filtró, este procedimiento se repitió con otros 35 y 30 mL de solvente. Lo extraído, se dejó evaporar, y posteriormente, se diluyó en 5 mL de Tetracloroetileno ( $C_2Cl_4$ ) y se leyó en el equipo de espectrometría infrarroja (marca Infracal modelo TOG/TPH Analyzer) previamente calibrado mediante la lectura de solvente limpio.

#### 5.5.2 Bioensayo de toxicidad aguda.

Este ensayo, se realizó con la lombriz de tierra *Eisenia foetida*, que pertenece a la familia Lumbricidae. Se utilizó como testigo solo agua desionizada. La prueba consiste en la exposición de las lombrices a sustancias de pruebas sobre un papel filtro húmedo, con la finalidad de identificar el potencial tóxico del compuesto en el lixiviado del material. El tiempo de exposición o duración de la prueba es de 48 horas (OCDE, 1984).

Las lombrices colocadas en el interior de los frascos fueron individuos adultos de 0.300 - 0.400 gramos de peso. Los recipientes utilizados fueron cilíndricos de vidrio de boca ancha con diámetro de 5 cm x 8 cm de largo. Estos, fueron cubiertos con papel para evitar la entrada de luz y evitar el estrés o la muerte de los organismos de prueba.

En el interior de cada frasco, se colocó una pieza de papel filtro casi igual al diámetro interior del recipiente. Luego, utilizando una micropipeta de 1000  $\mu$ L, se añadieron sobre el papel filtro 2000  $\mu$ L de la solución de extracto PECT procedentes de la mezcla preparada. Después, se colocó un organismo por frasco realizándose 10 repeticiones por cada muestra sometida al bioensayo. Al final, los recipientes fueron cubiertos con una tela porosa para garantizar la disponibilidad de aire y evitar la pérdida de humedad, entrada de luz y el escape de algún organismo.

Al cumplirse las 24 y 48 h de prueba, se procedió a observar en los organismos aspectos o signos de estrés como: cambio de color, pérdida de humedad, movimiento, reacción al estímulo y presencia de líquido celómico (mayor indicador de la presencia de constituyentes tóxicos en el material). Los organismos que sobrevivieron al final de las 48 h, fueron lavados con agua destilada y pesados. Los resultados se reportaron como porcentaje de sobrevivencia y mortalidad.





## 5.6 Experimentación iterativa

Cuando se busca un tratamiento con la dosis óptima de reactivo ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que garantice resultados que cumplan con los criterios establecidos mediante la aplicación de cantidades mínimas del agente en cuestión, es necesario hacer varias pruebas preliminares o exploratorias para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Este diseño experimental, se basó en una serie de repeticiones iterativas (diferentes concentraciones aceite/recortes-dosis de agente aglomerante). La iteración, se ha utilizado para construir modelos para la gestión de toma de decisiones. Un proceso iterativo es una herramienta fundamental para llevar a cabo investigación dirigida a crear modelos y procesos de diseño capaces de reducir el tiempo necesario para completar el desarrollo de un producto (Nevins y Whiney, 1989; Clark y Fujimoto, 1991; Smith y Tjandra 1998; Hernández-Acosta, 2018).

Las iteraciones consistieron en la dosificación de diferentes cantidades del agente aglomerante en unidades experimentales de tratamiento (UET) de cada mezcla preparada. Después, cada prueba fue caracterizada por los parámetros de HTP en extracto PECT y toxicidad aguda. Posteriormente, los resultados fueron sometidos a una toma de decisión basado en el análisis de los datos arrojados en la caracterización de las UET (ej. estadística descriptiva y la elaboración de gráficas para determinar tendencias). Si alguna iteración cumplía con los criterios propuestos (Tabla 3); entonces, se encontraría el tratamiento con la dosis óptima del agente aglomerante para la estabilización química de los HTP presentes en el material, siendo esto comprobado mediante la disminución en la concentración de HTP lixiviables y toxicidad aguda del RPBA tratado. Lo anterior, se puede observar en la siguiente Figura 7.

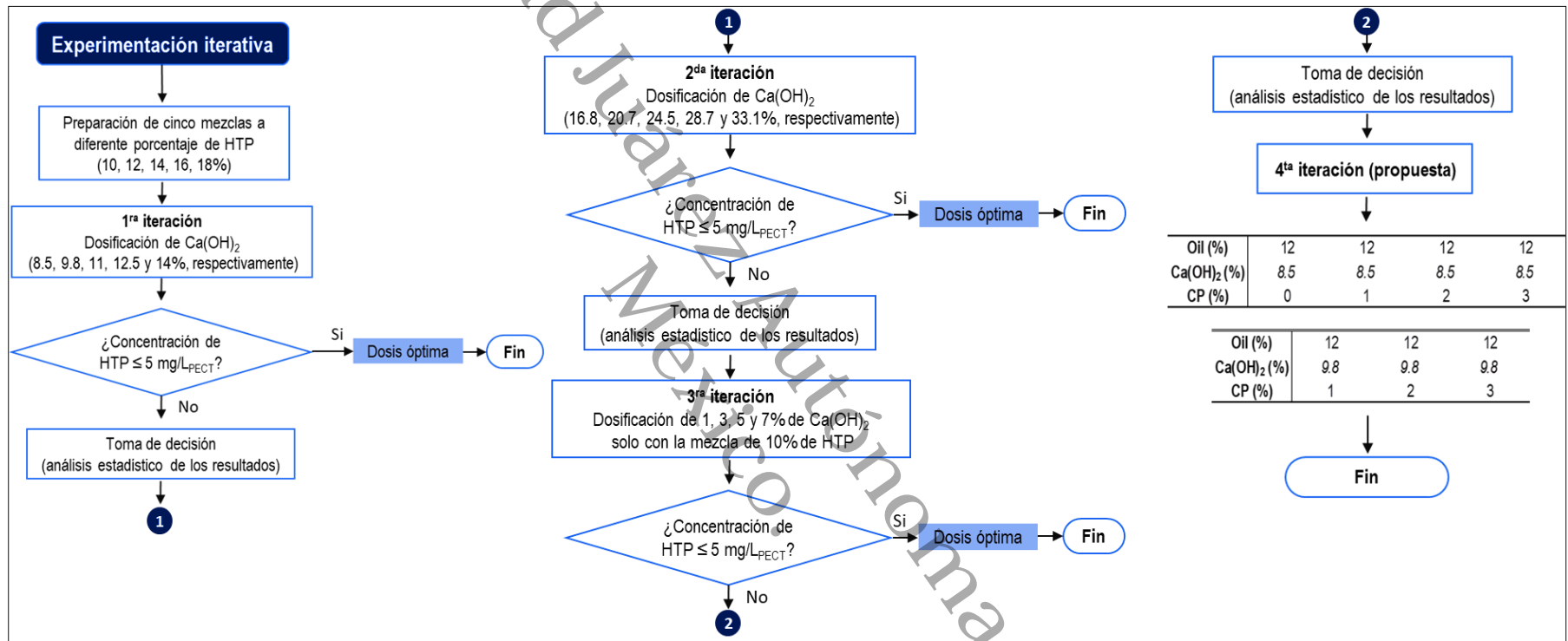


Figura 7. Proceso de la experimentación iterativa.





**Tabla 3.** Criterios propuestos en el proyecto.

<b>HTP en extracto PECT</b>	<b>Análisis de Toxicidad Aguda</b>
Suelos arenosos $\leq 5$ mg/L <sub>PECT</sub> *	$\leq 10\%$ de mortalidad sin efectos graves**

\*Bienes Sustentables, S.A. de C.V. - SEMARNAT.

\*\*Presente trabajo.

El criterio de HTP en extracto PECT surge a partir de trabajos en campo sobre recortes de perforación base aceite realizados por el Laboratorio de Remediación, previamente autorizados ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y el criterio de toxicidad aguda, se propuso como un aporte original de este trabajo.

#### 5.6.1 Tratamiento de estabilización química.

La aplicación de los tratamientos de EQ, consistieron en la adición de diferentes dosis del agente aglomerante en las UET que luego fueron mezclados de forma manual en base seca, utilizando una cuchara de acero inoxidable, bajo un tiempo de 10 minutos de homogenización. Luego, de forma controlada se vertió agua en cada prueba utilizando una probeta de vidrio de 250 mL hasta obtener una consistencia de pasta saturada (sin exceso de agua). Posteriormente, se mezcló hasta alcanzar un aspecto homogéneo. Al finalizar, las unidades experimentales fueron sometidas a un tiempo de curado (fraguado) de 28 días para su secado y brindar espacio para el adecuado proceso puzolánico.

#### 5.7 Caracterización de los tratamientos de EQ

Al concluir el tiempo de fraguado, las UET fueron caracterizadas por los parámetros:

- HTP en extracto PECT (NOM-053-SEMARNAT-1993; EPA 418.1).
- Toxicidad aguda (Contacto con papel filtro OECD, 1984) en el extracto PECT.



## 6. Resultados y discusión

### 6.1 Caracterización del material

A continuación, en las siguientes Tablas 4 y 5 se presentan los resultados de los análisis realizados al material recolectado en este trabajo.

**Tabla 4.** Caracterización del aceite recuperado.

Parámetro	Valor	Método	Clasificación
°API	32.6	ASTM D287-12b	Ligero

El aceite recuperado presentó un valor de °API ligero, indicando que es un petróleo compuesto por hidrocarburos relativamente sencillos como alcanos lineales e incluso alifáticos ligeros, fáciles de degradar, tóxicos, semi-volátiles y solubles, propiedades que los hace muy lixiviables, permitiéndoles fluir con facilidad a través de los poros del suelo o material de similar naturaleza que los contenga, dificultando de esta forma su inmovilización.

**Tabla 5.** Caracterización del RPBA.

Parámetro	Valor	Método	Clasificación
°API	18.86	Morales et al., 2013	Pesado
CE	4.38 dS/m	NOM-021-SEMARNAT-2000	Salino
Dens. Aparente	1.10 g/cm <sup>3</sup>	NOM-021-SEMARNAT-2000	Baja compactación
Dens. Real	1.82 g/cm <sup>3</sup>	Muñoz et al., 2013	
HTP en extracto PECT	94,798.72 mg kg <sup>-1</sup>	NOM-053-SEMARNAT-1993; EPA 418.1	Baja
Humedad	2.63%	Térmico	Baja
pH	8.60	NOM-021-SEMARNAT-2000	Fuerte alcalinidad
Textura	55% arena 22% arcilla 23% limo	NOM-021-SEMARNAT-2000	Franco arenoso arcilloso

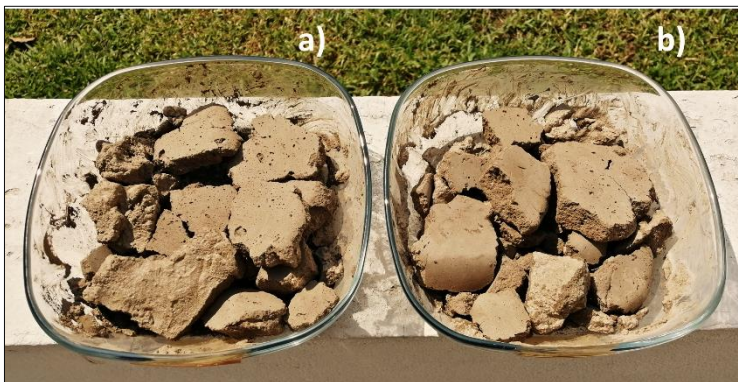
El RPBA recolectado mostró un valor de °API pesado señalando que este material contiene hidrocarburos de alto peso molecular como alcanos ramificados, cíclicos y policíclicos, compuestos polares, resinas y asfálticos difíciles de descomponer, no volátiles, con baja o nula

toxicidad y muy viscosos, propiedades que los convierten en menos solubles. Por lo tanto, siendo más fáciles de estabilizar químicamente en el material. Aunado a esto, el recorte tiene una textura con un alto porcentaje de arenas, revelando con esto que aquellos compuestos de bajo peso molecular pueden lixiviarse con facilidad (Knop et al., 2005).

Por otra parte, el RPBA mantuvo un contenido de humedad bajo, presentó una densidad aparente y real de baja compactación, indicando que el material tiene una buena área porosa. Sin embargo, esta propiedad pudo interferir en el secuestro de HTP muy solubles, esto se comprueba con la presencia de alto porcentaje de partículas granulares de arena. Además, el RPBA tuvo un pH de 8.60 (fuertemente alcalino), posiblemente por los aditivos que contienen los fluidos de perforación base aceite que típicamente emplean sosa cáustica y también, esta condición pudo haber facilitado la pronta formación de matrices cristalinas de Silicatos de Calcio Hidratados (S-C-H) y Aluminatos de Calcio Hidratados (A-C-H), donde los contaminantes fueron secuestrados o estabilizados (Méndez-López, 2008a; Álvarez-Coronel, 2010; FAO, 2020).

#### 6.1.1 Selección del agente aglomerante.

En la prueba preliminar de tratabilidad con los dos agentes aglomerantes. El resultado en apariencia física y solidez en ambas muestras de RPBA tratadas fueron similares (Figura 8). Sin embargo, se platearon dos escenarios: a) una planta de tratamiento de recortes y b) un proyecto a escala industrial, y bajo criterios de disponibilidad, transporte y costo en el mercado. Se concluyó, que es más factible y viable la adquisición de bultos de hidróxido de calcio.



**Figura 8.** Resultado final de la prueba preliminar con a) hidróxido de calcio y b) CP.



## 6.2 Elaboración del suelo artificial

En la siguiente Tabla 6, se muestran los resultados de los cálculos para obtención de un suelo artificial con similar porcentaje de agregados que en el RPBA. Asimismo, se observa que el contenido de arena y arcilla en ambos materiales es casi igual a diferencia del limo, debido a las composiciones base de los suelos utilizados (ver Tabla 2). Cabe mencionar, que se prepararon solo 100 g de SA porque los bioensayos de toxicidad aguda no requieren gran cantidad de muestra.

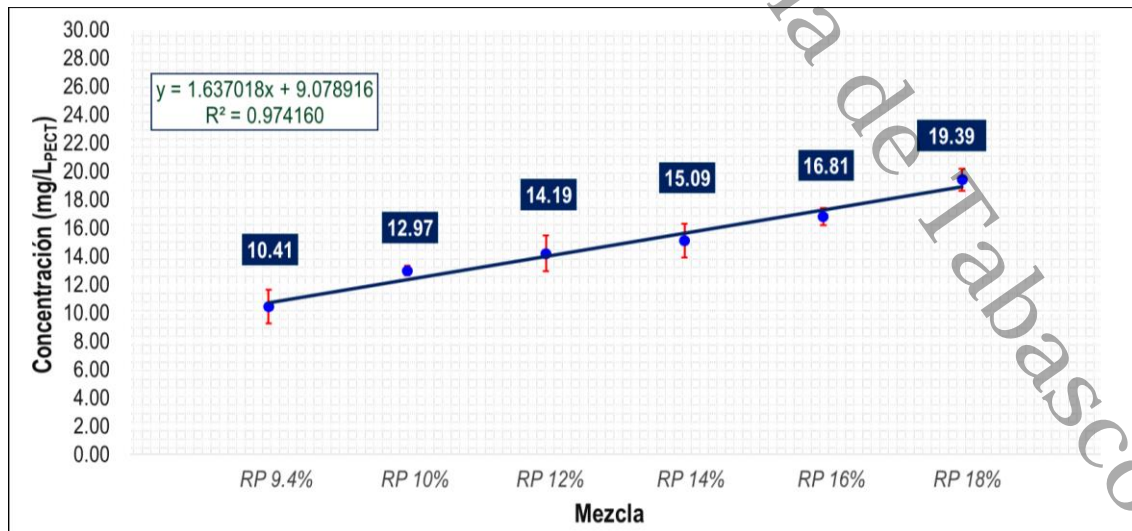
**Tabla 6.** Cálculos para la elaboración del SA.

Composición	Arenosol (%)	Fluvisol (%)	Vertisol (%)	Suelo artificial (%)	RPBA (%)	Cantidad (g)
arena	56.1	1.4	0.1	57.3	55	64.2
limo	2.4	5.8	7.4	15.6	23	16.8
arcilla	5.8	9.9	11.4	27.1	22	18.9

## 6.3 Caracterización de mezclas

### 6.3.1 Análisis de HTP en extracto PECT.

En la siguiente Figura 9, se aprecian los resultados de la caracterización del parámetro de HTP en extracto PECT de las mezclas antes de la aplicación del tratamiento de EQ.



**Figura 9.** Gráfica de HTP lixiviables de las mezclas sin tratamiento.



En la gráfica, se puede observar el potencial que tiene cada mezcla para dispersar HTP en el ambiente sin la aplicación del tratamiento de estabilización química. La importancia de este análisis radica en determinar el grado de movilidad de los constituyentes de un residuo, que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente, en este caso los HTP contenidos en el recorte de perforación. (SEMARNAT, 1993; Pascual-Chablé, 2017).

### 6.3.2 Bioensayo de toxicidad aguda.

En la siguiente Tabla 7, se presentan los valores obtenidos de las pruebas de toxicidad aguda.

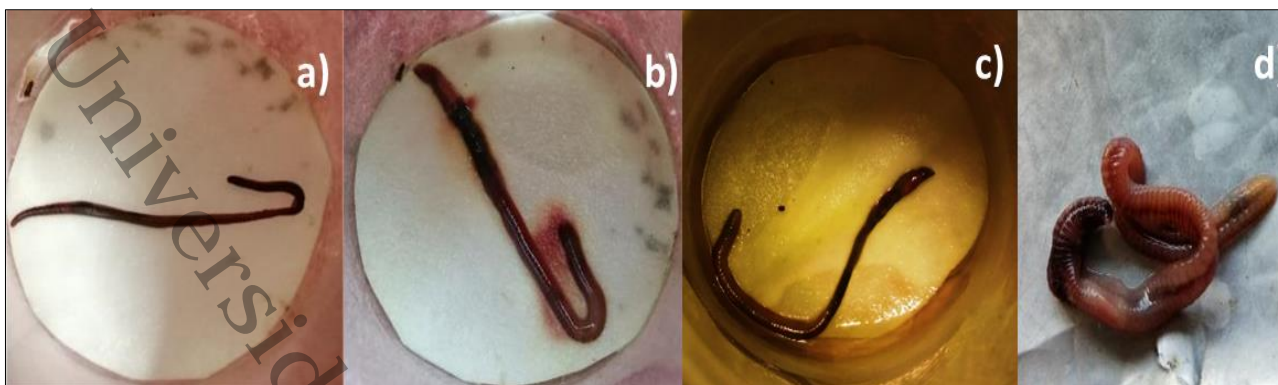
**Tabla 7.** Resultados del análisis de toxicidad aguda de las mezclas sin tratamiento.

Muestra	Reps	Lomb. Total	Lomb. Muertas	Lomb. Vivas	% Supervivencia	% Mortalidad	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dif. Prom (g)
TESTIGO	4	40	0	40	100	0	0.387	0.373	0.013
SA	3	30	0	30	100	0	0.399	0.377	0.022
9.4%	3	30	0	30	100	0	0.381	0.408	-0.027
10%	3	30	1	29	96.67	3.33	0.361	0.321	0.039
12%	3	30	0	30	100	0	0.370	0.324	0.046
14%	3	30	1	29	96.67	3.33	0.364	0.333	0.031
16%	3	30	0	30	100	0	0.355	0.320	0.035
18%	3	30	1	29	96.67	3.33	0.386	0.338	0.048

Se observa que las mezclas sin tratamiento no presentan toxicidad aguda para los organismos de prueba. Solamente en las pruebas de 10, 14 y 18% hubo una supervivencia del 96.67% y en las demás se obtuvo el 100%. Cabe mencionar, no se presentó una pérdida de peso promedio significativa (~ 0.026 g) en la población expuesta al material.

Por otra parte, en los *testigos* no se observó ningún efecto tóxico durante y después del periodo de prueba (48 h) (Figura 10), dando así por válido la autenticidad del bioensayo. Por consiguiente, se consideró el no analizar los tratamientos de E/Q por medio de este parámetro sino solamente por HTP en extracto PECT. Condiciones similares fueron reportadas por Pascual-Chablé (2017) al tratar un recorte de perforación base aceite con una concentración de 11.5% de HTP en donde el material lixiviable no presentó toxicidad en los organismos de prueba porque los componentes tóxicos eran poco solubles y los que estaban no presentaron ningún daño grave para las lombrices.





**Figura 10.** Efectos tóxicos presentados en los organismos: a) Seco (10% HTP), b) expulsión de sangre (14% HTP), c) expulsión de líquido celómico (18% HTP) y d) sanos (100% de testigos).

## 6.4 Experimentación iterativa y aplicación de tratamientos de EQ

### 6.4.1 Iteración 1.

En la siguiente Tabla 8 se presentan los resultados encontrados en la primera iteración.

**Tabla 8.** Tratamientos de EQ aplicados en la 1<sup>ra</sup> iteración.

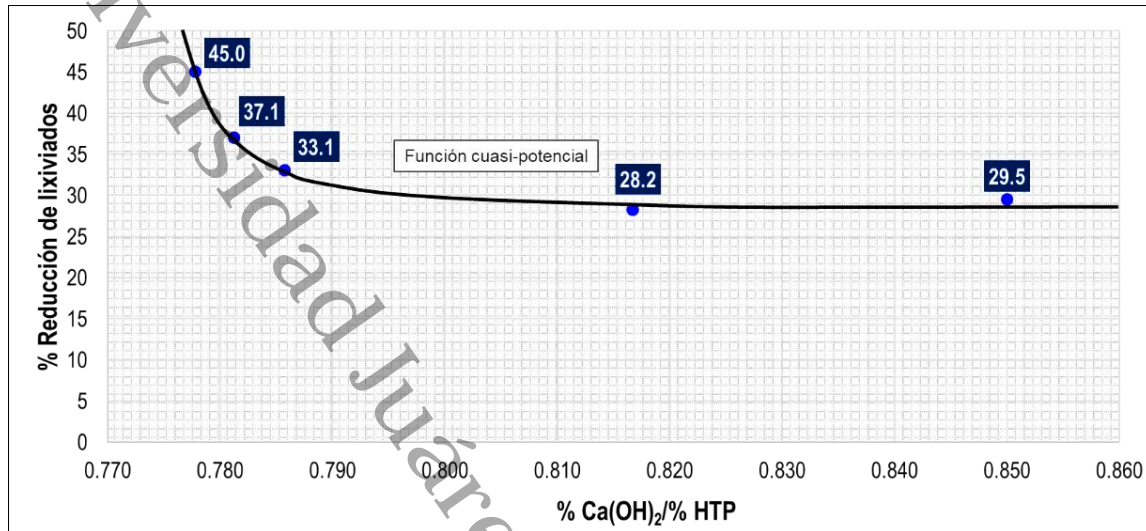
Mezcla (%HTP)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Agua (mL)	Lixiviado (mg/L <sub>PECT</sub> )	Reducción (%)
10	8.5	70	9.14	29.50
12	9.8	70	10.18	28.25
14	11	60	10.10	33.08
16	12.5	55	10.58	37.05
18	14	50	10.66	45.00

Cada prueba estaba integrada por cuatro UET de 150 g cada uno; haciendo un total de 20 UET. Las dosificaciones fueron establecidas conforme al juicio profesional y con base a trabajos realizados anteriormente en el Laboratorio de Remediación (Guzmán-Osorio, 2005; Méndez-López, 2008b; Álvarez-Coronel; 2010; Soberano-Álvarez, 2014).

Cabe destacar, que independientemente del porcentaje de HTP y dosificación aplicada, todos los tratamientos llegaron a una concentración límite de HTP lixiviables promedio de 10.1 mg/L<sub>PECT</sub>. En esta primera iteración, el mayor porcentaje de reducción de HTP se logró en la



prueba de 18% (45%) respecto a la mezcla sin reactivo. Lo antes mencionado, se demuestra en la siguiente Figura 11.



**Figura 11.** Porcentaje de reducción de lixiviados de la primera iteración.

En esta gráfica, se observa una relación cuasi-potencial. Es decir, con el incremento en la dosificación de cal hidratada, se redujeron los lixiviados hasta cierto punto. Aunque se adicionaba más reactivo no se alcanzaron mayores reducciones de HTP. Esto puede deberse a los hidrocarburos muy solubles contenidos en el aceite recuperado, añadido. También, a la falta de fuentes puzolanas (compuestos de Si y Al) para reaccionar con el aglomerante agregado (Álvarez-Coronel, 2010).

#### 6.4.2 Iteración 2.

En esta segunda iteración, cada tratamiento se realizó por cuadruplicado (150 g cada UET). Las dosificaciones aplicadas en esta iteración, se basaron en el análisis de los resultados de la iteración anterior.

El análisis de los datos, consistió en la realización de una línea de tendencia a partir de la relación (%cal hidratada/%HTP contra %reducción lograda) para obtener una función polinómica (descriptiva); sobre la cual, se hizo una extrapolación para conocer los %cal hidratada que se dosificarían en esta iteración. Cabe mencionar, que se les agregó un 10% más para tratar de asegurar concentraciones de HTP lixiviables por debajo de 5 mg/L<sub>PECT</sub>.

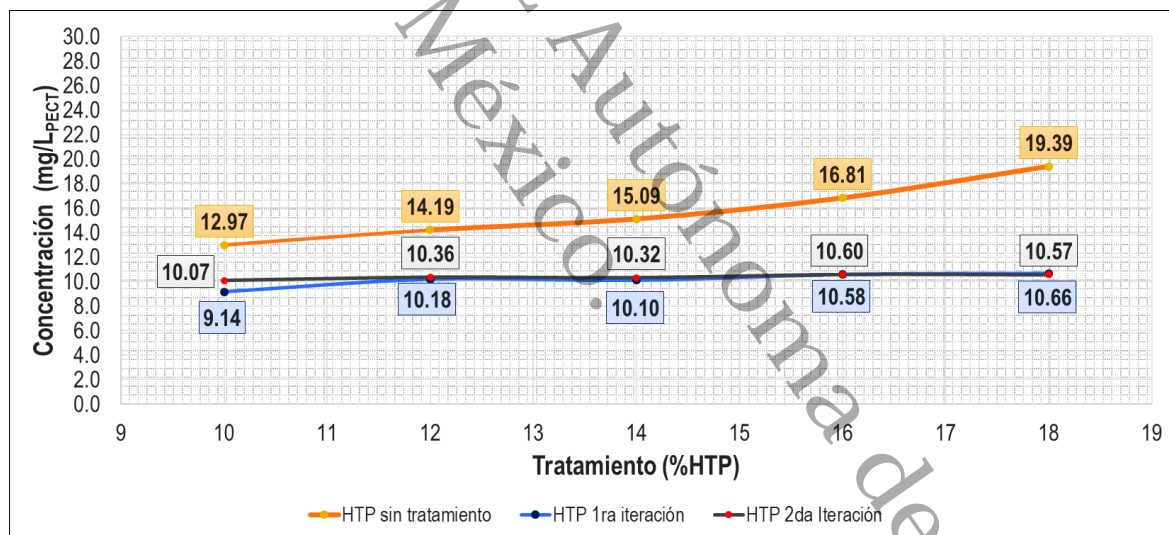




**Tabla 9.** Tratamientos de EQ aplicados en la 2<sup>da</sup> iteración.

Mezcla (%HTP)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Agua (mL)	Lixiviado (mg/L <sub>PECT</sub> )	Reducción (%)
10	16.83	80	10.07	22.32
12	20.72	80	10.36	26.97
14	24.49	75	10.32	31.60
16	28.69	75	10.60	36.92
18	33.07	75	10.57	45.51

Los resultados obtenidos fueron congruentes con los de la prueba anterior como se explicó en la Figura 11. Pues, independientemente de la dosificación aplicada (un poco más del doble que en la primera iteración), todos los tratamientos llegan a una concentración promedio de 10.3 mg/L<sub>PECT</sub> similar a la primer prueba (10.1 mg/L<sub>PECT</sub>). Nuevamente, el mayor porcentaje de reducción de HTP lixiviables se logró en la mezcla de 18% de HTP (45.5%) respecto a la mezcla sin reactivo. Lo anterior, se comprueba en la siguiente Figura 12.



**Figura 12.** Gráfica de comparación de HTP lixiviables de las UET sin tratamiento, 1<sup>ra</sup> y 2<sup>da</sup> iteración.

Se puede apreciar, la similitud de los resultados de la 1<sup>ra</sup> y 2<sup>da</sup> iteración. De igual forma, aun doblando la cantidad de reactivo, no se logró mayor reducción en la concentración de los HTP en los lixiviados.



### 6.4.3 Iteración 3.

En esta iteración, las dosificaciones se basaron en los siguientes supuestos:

1. Los resultados de las iteraciones anteriores, mostraron que las altas dosificaciones de cal hidratada, llegaron a las mismas concentraciones de HTP lixiviables.
2. La mezcla de 10% contenía la menor cantidad de aceite recuperado añadido y posiblemente, se podría identificar si el aceite agregado causaba una interferencia en los resultados.
3. Al dosificar una menor cantidad de reactivo en una mezcla con poco aceite agregado, posiblemente, podría encontrarse una dosis con concentraciones inferiores a 9.4 mg/L<sub>PECT</sub>.

Sumando a lo antes dicho, las UET fueron de 145 g c/u por triplicado; porque, se terminó el lote de la mezcla de 10%. Y se decidió, no preparar una nueva debido a que habría una interferencia en los resultados.

**Tabla 10.** Tratamientos de EQ aplicados en la 3<sup>ra</sup> iteración.

Mezcla (%HTP)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Agua (mL)	Lixiviado (mg/L <sub>PECT</sub> )	Aumento (%)
10	1	65	22.02	41.11
10	3	65	25.91	49.95
10	5	65	27.58	52.99
10	7	65	22.91	43.41

En la tabla, se observa que los HTP lixiviables aumentaron en un orden de dos veces por encima del valor de la mezcla de 10% HTP sin tratamiento (12.97 mg/L<sub>PECT</sub>). Cabe resaltar, que se generó un aumento en comparación de las iteraciones anteriores. Estos resultados, son presentados gráficamente en la siguiente Figura 13.

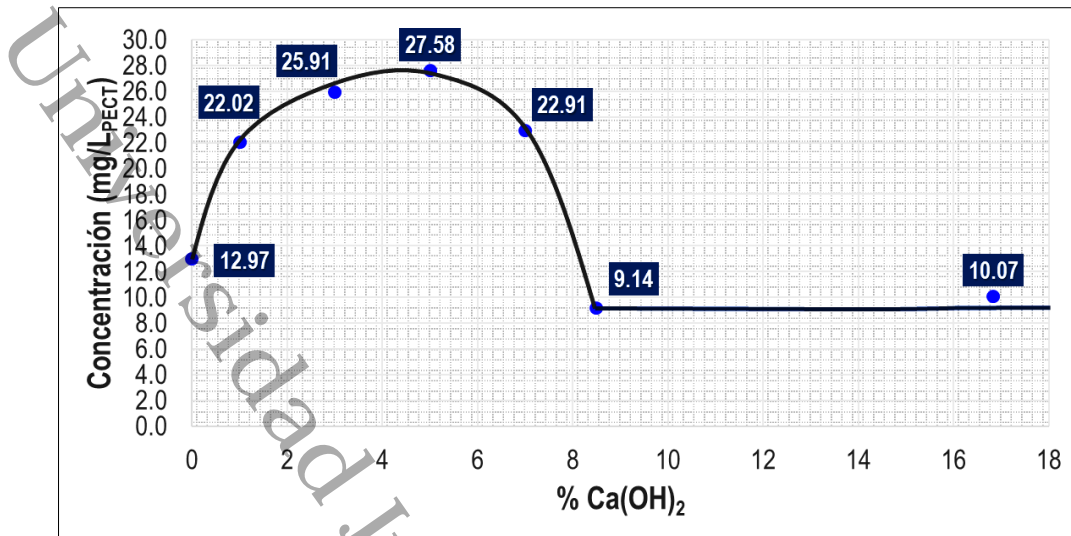


Figura 13. Gráfica de HTP lixiviables de la mezcla de 10% sin tratamiento, 1<sup>er</sup>, 2<sup>da</sup> y 3<sup>ra</sup> iteración.

En la gráfica, se refleja una curva completa de los tratamientos de 10% de HTP. Donde al agregar poco reactivo, en vez de reducir los HTP en los lixiviados, se incrementaron. Álvarez Coronel (2010) también encontró este efecto. Se atribuyó en aquel trabajo a que el material presentaba áreas porosas, en donde las matrices cristalinas no eran muy fuertes y al agregar aún más cal hidratada, se empezó a superar este efecto y reducir la cantidad de HTP hasta un mínimo de 9.14 mg/L con 8.5% de cal. Desafortunadamente, al agregar más, no se logró reducir aún más los lixiviados. Esto podría haber sido porque no hay suficientes puzolanas (arcillas con Si) en el RPBA para reaccionar con la cal.

Petrucci et al. (2017) y Brown et al. (2018) señalan desde un punto de vista químico que los reactivos no están presentes en las cantidades idóneas, produciéndose así una condición denominada *reactivo limitante*. Es decir, el grado máximo de encapsulamiento de HTP, ya se había logrado con la cantidad de arcilla (22%) presente en el RPBA y al consumirse, no se logró encapsular una mayor cantidad de contaminante; independientemente, de la dosificación de cal hidratada añadida. Por tal motivo, el HTP no estabilizado, es lo que se tiene como lixiviado (Chang, 2011; Chang y Goldsby, 2016).

Por lo tanto, es necesario la agregación de una fuente rica en sílice y alúmina que reaccionen con el calcio de la cal para la formación de más silicatos y aluminatos de calcio hidratados, como a aquellos formados en el cemento de Portland (aglomerante/puzolana en una proporción 3:1) los cuales se encargan de encapsular más HTP en matrices cristalinas,



lográndose de esta forma una mejor estabilización química. Asimismo, los aditivos deben elegirse teniendo en cuenta los constituyentes del residuo para una estabilización óptima. (Trusell y Spence, 1994; Méndez-López, 2008a; Álvarez-Coronel, 2010; Hernández-Acosta, 2018).

#### 6.4.4 Iteración 4.

Finalmente, con los resultados contundentes de las tres iteraciones anteriores, se procedió a la elaboración de otras dos pruebas como se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 11.** Tratamientos de EQ aplicados en la 4<sup>ta</sup> iteración.

Mezcla (%HTP)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	cemento Portland (%)
12	9.8	1
12	9.8	2
12	9.8	3
12	8.5	0
12	8.5	1
12	8.5	2
12	8.5	3

Tomando en cuenta, la necesidad de agregar una fuente rica en sílice y alúmina, se optó por añadir cemento Portland para ayudar a mejorar la reacción puzolánica y lograr inmovilizar una mayor cantidad de HTP lixiviables para alcanzar a cumplir con el criterio propuesto de 5 mg/L<sub>PECT</sub>. En este caso, se seleccionó la mezcla de 12% de HTP, debido a que la de 10% de HTP se terminó y la de doce contenía todavía una menor cantidad de aceite agregado en comparación con las demás mezclas preparadas. Cabe añadir, que cada tratamiento se realizó por cuadruplicado (60 g c/u) sumando un total de 28 UET.

Es importante mencionar, que no se logró concluir con el desarrollo completo de esta última iteración debido a la actual contingencia sanitaria (Covid-19), porque el acceso a los laboratorios de la DACBiol-UJAT fue restringido por órdenes de las autoridades Universitarias, de Salud y Estatales.



Por otra parte, se logró el cumplimiento parcial de los criterios establecidos en este trabajo, y debido a que en la actualidad no existe una Norma Oficial Mexicana (NOM) que establezca algún límite máximo permisible (LMP) de hidrocarburos en recortes de perforación base aceite. Los resultados de HTP lixiviables de la primera iteración, sí estuvieran presentes en una descarga de aguas residuales o congénitas desde un punto de referencia técnico-normativo podrían cumplir con los LMPs establecidos en las siguientes NOMs:

- NOM-001-SEMARNAT-1996
  - Grasas y aceites (15 mg/L) promedio mensual.
- NOM-143-SEMARNAT-2003
  - Agua dulce (15 mg/L), aguas costeras y zonas marinas (40 mg/L).

De igual forma, debido a que un RPBA no es un suelo natural, sino un material de características geológicas semejante, los resultados también podrían cumplir como referencia técnica con lo establecido en la:

- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012
  - Fracción media ( $5,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y pesada ( $6,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) para un suelo de uso industrial.

Esto último, se basa en el *cálculo del límite máximo permisible en lixiviados* (1) y (Tabla 12) utilizado por Álvarez-Coronel (2010).

Para el cálculo realizado, se consideró lo siguiente:

- Una capa de 2 m de material tratado.
- 10 cm de profundidad de un suelo limpio.
- Densidad aparente del RPBA ( $1.10 \text{ g/cm}^3$ ).
- Una densidad  $1.6 \text{ g/cm}^3$  de suelo no contaminado (Álvarez-Coronel, 2010).



$$C_{SB-LIX} = C_{PECT} \times C_{PP} \times \left( \frac{\rho_{SR}}{\rho_{SB}} \right) \times \left( \frac{P_{SR}}{P_{SB}} \right) \quad (1)$$

Donde:

$C_{SB-LIX}$  = concentración (en mg HTP/kg, base seca) que se espera en los 10 cm de suelo no contaminado debido al lixiviado del suelo remediado.

$C_{PECT}$  = concentración en el extracto PECT en mg HTP/L extracto.

$C_{PP}$  = coeficiente de proporción PECT; (0.2 L extracto PECT/0.01 kg sólido) = 20 L/kg suelo remediado.

$\rho_{SR}$  = densidad en base seca del material remediado en  $g/cm^3$ .

$\rho_{SB}$  = densidad en base seca del suelo no contaminado (suelo base) en  $g/cm^3$ .

$P_{SR}$  = profundidad del suelo remediado en cm.

$P_{SB}$  = profundidad del suelo no contaminado en cm.

**Tabla 12.** Resultados del cálculo del límite máximo permisible en lixiviados con datos de la 1<sup>er</sup> iteración.

Tratamiento (%HTP)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Lixiviado (mg/L <sub>PECT</sub> )	HTP (mg kg <sup>-1</sup> )*
10	8.5	9.14	2,514.02
12	9.8	10.18	2,799.63
14	11	10.10	2,776.88
16	12.5	10.58	2,909.27
18	14	10.66	2,932.17

\*Concentración calculada en suelo base desde nivel de lixiviados según Álvarez-Coronel (2010).

Los resultados en la tabla demuestran que el material tratado podría reciclarse como material de relleno sobre suelos no arenosos, según lo establecido en el Reglamento de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Tabasco, que en su artículo 60 señala:

“La reutilización o reciclaje de residuos de manejo especial provenientes de tratamientos autorizados para el caso de recortes o lodos de perforación base agua o base aceite u otros de naturaleza semejante podrán utilizarse en:





- I. Construcción y mantenimiento de carreteras, caminos, vialidades u otras obras de infraestructura o actividades económicas en el estado; y
- II. Para el relleno y nivelación de suelos con uso industrial” (SEMARNAT, 1997; 2005, 2013; PJET, 2014).

Cabe enfatizar, que el cálculo realizado y el nivel de protección fueron hechos para la disposición del material tratado sobre *suelos no arenosos*. De disponer el material sobre un *suelo arenoso*, aun cumpliendo con estos criterios, existiría la posibilidad de lixiviación hasta el nivel freático ocasionando su contaminación. Sí se desea reducir aún más las concentraciones de HTP presentadas en la Tabla 12, para poder utilizar el material como relleno encima de *suelos arenosos*; sería conveniente la realización de la cuarta iteración propuesta para trabajos futuros (Tabla 11). Esto, para alcanzar el nivel indicado como protección en la Tabla 3.

Finalmente, el tratamiento de estabilización química aplicado en este trabajo permite disponer o reciclar el material sobre *suelos no arenosos* y para este fin se tendría que cumplir con las autorizaciones pertinentes ante la Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático (SBSCC) y la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA).

## 7. Conclusiones

El recorte de perforación base aceite presentó un valor de °API pesado de 18.8 con una concentración de 9.4% de HTP y un pH fuertemente alcalino de 8.60, así como una textura franco arenoso arcilloso (55% arena, 22% arcilla, 23% limo). El aceite recuperado mostró un valor de °API ligero de 32.6. El hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) fue el agente aglomerante seleccionado por su disponibilidad, fácil transporte y costo económico en el mercado. El tratamiento de estabilización química tuvo límites físicos (lixiviación de HTP de °API ligero y alto porcentaje de arena en el material) y químicos (falta de una fuente rica en sílice y alúmina para la formación de S-C-H y A-C-H que reaccionen con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - arcillas para formar matrices cristalinas que generen un mayor secuestro de HTP). Los mejores resultados en relación HTP lixiviados-dosis de hidróxido de calcio, se obtuvieron en la primera iteración (8.5, 9.8, 11, 12.5 y 14% de cal hidratada). Se logró parcialmente el cumplimiento de los criterios



propuestos y desde un marco de referencia técnico-normativo los resultados de la primera iteración cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y NOM-143-SEMARNAT-2003. Por lo tanto, el material tratado podría ser reciclado para el relleno y nivelación de suelos con uso industrial según lo indicado en el artículo 60 del Reglamento de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Tabasco.

## 8. Recomendaciones

- Es necesario añadir cierta proporción de puzolanas como las formadas en el cemento Portland (1:3) para lograr una mejor estabilización química.
- Se proponen las dos pruebas establecidas en la cuarta iteración para trabajos futuros (ver Tabla 11). Con esto es posible que el material, se pueda utilizar para rellenar áreas con otros usos, no solo industrial o construcción de carreteras.
- Realizar las mismas mezclas de 10, 12, 14, 16 y 18% de HTP con un aceite similar en grados API al del recorte de perforación.
- Replicar este método con mezclas (aceite + recorte) con grados API ligero, mediano y pesado.
- Programar con el mismo lapso de tiempo los análisis de caracterización de los tratamientos al término de la fase de curación.
- Realizar curvas de calibración con el hidrocarburo de las mezclas preparadas.



## 9. Referencias

1. Al-Ansary, M. S., y Al-Tabbaa, A. (2007). Stabilisation/solidification of Synthetic Petroleum Drill Cuttings. *Journal of Hazardous Materials*, 141(2), 410-421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.079>
2. Álvarez-Coronel, G. (2010). Estabilización/solidificación para tratar suelos contaminados con desechos aceitosos de la presa agua de mina, Unidad Minera, Texistepec, Veracruz [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
3. American Society for Testing and Materials International (ASTM). (2012). ASTM D287-12b, Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method). West Conshohocken, Pennsylvania, United States. <https://doi.org/10.1520/D0287-12B>
4. Ball, A. S., Stewart, R. J., y Schliephake, K. (2012). A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 30(5), 457-73. <https://doi.org/10.1177/0734242X11419892>
5. Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M. y Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14.<sup>a</sup> ed.). Pearson.
6. Chang, R. (2011). *Fundamentos de Química*. McGraw-Hill.
7. Chang, R. y Goldsby, K. A. (2016), *Chemistry* (12.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
8. Clark, K. y Fujimom, T. (1991). *Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Harvard Business School Press.
9. Conner, J. R., y Hoeffner, S. L. (1998a). The History of Stabilization/Solidification Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4), 325-396. <https://doi.org/10.1080/10643389891254241>
10. Conner, J. R., y Hoeffner, S. L. (1998b). A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4), 397-462. <https://doi.org/10.1080/10643389891254250>



11. Environmental Protection Agency (EPA). (1986). Method 418.1 mod. Petroleum hydrocarbon, total recoverable. Spectrophotometric infrared. Washington, DC, United States. p. 8.
12. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report 12th. Edition. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/asr12\\_full\\_document.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/asr12_full_document.pdf)
13. Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Superfund Remedy Report, 15th Edition. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/100000349.pdf>
14. Guzman-Osorio, F. J. (2005). Prueba de Factibilidad a Escala Laboratorio para la Remediación del Suelo Contaminado con Hidrocarburos de la Presa Agua de Mina de la Unidad Minera Texistepec, Veracruz [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
15. Hernández-Acosta, L. (2018). Aprovechamiento de hidrocarburos intemperizados para la preparación de mezclas asfálticas de granulometría densa [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
16. Huang, Z., Ziyang, X., Quan, Y., Jia, H., Li, J., Li, Q., Chen, Z., y Pu, K. (2018). A review of treatment methods for oil-based drill cuttings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 170, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/2/022074>
17. Ismail, A. R., Alias A. H., Sulaiman, R. W., Jaafar, M. Z., y Ismail, I. (2017). Drilling fluid waste management in drilling for oil and gas wells. Chemical Engineering Transactions, 56, 1351-1356. <https://doi.org/10.3303/CET1756226>
18. Khodja, M., Canselier, J., Dali, C., Hafid, S., y Ouahab, R. (2008). A Diagnostic of the Treatment of Oil Well Drilling Waste in Algerian Fields. Récents Progrès en Génie des Procédés, (94), 1-11.
19. Knop, A., Cruz, R. C., Heineck, K. S. y Consoli, N. C. (2005) Solidification/ stabilization of a residual soil contaminated by diesel oil. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, 1(2), 363–367.



20. Kogbara, R. B., Ayotamuno, J. M., Onuomah, I., Ehio, V., y Damka, T. (2016). Stabilisation/solidification and bioaugmentation treatment of petroleum drill cuttings. *Applied Geochemistry*, 71, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.05.010>
21. Ladu, J. L. C. , Demetry, P. L. , Athiba, A. L. , y Lako, S. T. V. (2018). Treatment of Petroleum Drill Cuttings by Water-Based Drill Cuttings Plant Using Solidification/Stabilization Treatment Method. *American Journal of Environmental Protection*, 6(4), 98-102. <https://doi.org/10.12691/env-6-4-1>
22. Leonard, S. A., y Stegemann, J. A. (2010). Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. *Journal of Hazardous Materials*, 174, 463-472. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.075>
23. Méndez, R., Gómez, P., Ledesma, J., y Cenicerros, C. (2013). Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 2(4), 18-37.
24. Méndez-López, M. J. (2008a). Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos mediante la utilización de cal viva. *Kuxulkab*, 14(26). <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a14n26.889>
25. Méndez-López, M. J. (2008b). Factibilidad de uso de suelo altamente contaminado con hidrocarburo de la Presa Agua de Mina, Unidad, Minera, Texistepec, Veracruz, como sub-base en la construcción de caminos [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
26. Morales, C. M., Adams, R. H., Guzmán, F., y Marín, D. (2013). Dilution-Extrapolation Hydrometer Method for Easy Determination of API Gravity of Heavily Weathered Hydrocarbons in Petroleum Contaminated Soil. *Energy and Environment Research*, 3(1), 115-124. <https://doi.org/10.5539/eer.v3n1p115>
27. Muñoz, D. J., Soler Aburto A., López Galindo F., y Hernández Moreno M. (2013). *Edafología, Manual de métodos de análisis de suelos*. UNAM.
28. Nevins, J. L. y Whitney, D. E. (1989). *Concurrent Design of Products and Processes: a Strategy for the Next Generation in Manufacturing*. McGraw-Hill.



29. Ohaus Corporation. (2002). Analizador de humedad MB35 [Equipo]. [https://scalenet.com/pdf/Ohaus\\_MB35\\_Moisture\\_Balance\\_Manual.pdf](https://scalenet.com/pdf/Ohaus_MB35_Moisture_Balance_Manual.pdf)
30. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). Propiedades Físicas del Suelo. Portal de Suelos de la FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
31. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (1984). Earthworm, acute toxicity tests. Guideline for testing of chemicals N° 207. Paris, Francia. p. 9.
32. Pascual-Chablé, J. (2017). Dos trenes de tratamientos químico-biológico para reducir hidrocarburos en recortes de perforación base aceite [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
33. Petróleos Mexicanos (PEMEX). (2019). Presenta Pemex y sus Empresas Productivas Subsidiarias Plan de Negocios 2019-2023. <https://www.pemex.com/acerca/plan-de-negocios/Paginas/default.aspx>
34. Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., y Bissonette, C. (2017). General chemistry: Principles and modern applications (11.ª ed.). Pearson.
35. Poder Judicial del Estado de Tabasco (PJET). (2014). Reglamento de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Tabasco. Periódico Oficial del Estado. <https://tabasco.gob.mx/leyes/descargar/1/1010>
36. Rasso, Z. (1999). Un siglo de perforación en México. Gaceta Ecológica, 54, 04-14.
37. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (2001). NMX-AA-117-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de hidrocarburos totales del petróleo (HTP's) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 21 de septiembre de 2001.
38. Secretaria de Gobernación (SEGOB). (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Diario Oficial de la Federación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019)





39. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1993). NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 22 de octubre de 1993.
40. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1997). NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 6 de enero de 1997.
41. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 7 de diciembre de 2001.
42. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). NOM-143-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 3 de marzo de 2005.
43. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2006). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-153-SEMARNAT-2006, Que establece las especificaciones ambientales para la inyección de recortes de perforación en formaciones receptoras. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 28 de noviembre de 2006.
44. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/GD001408.pdf>
45. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 10 de septiembre de 2013.



46. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
47. Smith, R., y Tjandra, P. (1998). Experimental observation of iteration in engineering design. *Research in Engineering Design*, 10(2), 107-117. <https://doi.org/10.1007/bf01616691>
48. Soberano-Álvarez, B. (2014). Tratamiento integral de terracería ácida y sedimentos contaminados con hidrocarburos para construcción de base de caminos en la unidad minera Texistepec, Veracruz [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
49. Trussell, S., y Spence, R. (1994). A review of solidification/stabilization interferences. *Waste management*, 14(6), 507-519. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0956-053X(94)90134-1)
50. Tuncan, A., Tuncan, M., y Koyuncu, H. (2000). Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction. *Waste Management and Research*, 18, 489-505. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3070.2000.00135.x>