



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ZACATENCO**

Lavado *In Situ* de un suelo contaminado con diesel, asistido con surfactantes.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA

Oscar Piña Maldonado

Directores de Tesis:
Dr. Luis Gilberto Torres Bustillos
M. en I. Felipe López Sánchez



Junio del 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 16:00 horas del día 21 del mes de junio del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:

"Lavado in situ de un suelo contaminado con diesel asistido con surfactantes."

Presentada por el alumno:

Piña
Apellido paterno

Maldonado
Apellido materno

Oscar
Nombre(s)

Con registro:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|

aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Luis Gilberto Torres Bustillos

M. en I. Felipe López Sánchez

M. en C. Ricardo Contreras Contreras

Dr. Jorge Meléndez Estrada

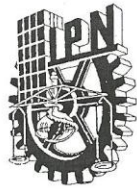
Dr. Mario Ulloa Ramirez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



M. en C. Pino Durán Escamilla

NARCOP:



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F. el día 25 del mes Junio del año 2012, el que suscribe Oscar Piña Maldonado alumno (a) del Programa de Maestría en Ingeniería Civil con número de registro A100301, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Luis Gilberto Torres Bustillos y M. en I. Felipe López Sánchez y cede los derechos del trabajo intitulado “Lavado In situ de un suelo contaminado con Diesel, asistido con surfactantes” al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección oscar_bio@yahoo.com.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Oscar Piña Maldonado

AGRADACIEMIENTOS

A Dios! Por probar de nuevo una vez más mi perseverancia a pesar de la adversidad y permitirme cumplir una meta, un sueño realizado! DE VERDAD MUCHAS GRACIAS.

A mis padres ya que sin su apoyo incondicional de toda la vida, no sería lo que soy actualmente. Todo se lo debo a ustedes dos. Son mi ejemplo a seguir. Les pido perdón por todo en lo que les he fallado, los AMO con todo mi corazón!

A mis hijas (Karo y Gaby), ese par de angelitos que son mi vida entera, su sonrisa me devuelve millones de esperanzas y amor. ¡Son lo mejor de mi vida!

Gaby (el AMOR de mi vida), por soportar tantas penurias a mi lado, por apoyarme y saber que existe alguien con quien puedo contar en las buenas y en las malas, al igual sabes que eres correspondida en igual medida a tus sentimientos y cariño. Te AMO!

A mis hermanos Eduardo y Antonio, de los cuales de cada uno recibí consejos oportunos y un apoyo incondicional. Lalo como siempre mil gracias por todo. A mis sobrinas que son muchas y un sobrino. Los quiero mucho y gracias por tantas sonrisas!

A mis abuelitas (Consuelo y Cipriana) a mis tíos principalmente Antonio, Elvira y Chela por todo su apoyo y cariño.

Así como a todos aquellos que en su respectivo momento me dieron ánimos para no desistir. Cuando mi necesidad fue mayor. A todos GRACIAS!

Al Instituto Politécnico Nacional, por la formación que obtuve de esta gran Institución!

A mis profesores muy en especial:

Dr. Luis Gilberto Torres Bustillos de la UPIBI-IPN, no tengo palabras para agradecerte todo lo que me apoyaste. Recuerdo cuando fui a buscar tema de tesis y le abriste las puertas a un completo extraño apoyándome completamente. Gracias por creer en mí y disculpa aquellas ocasiones en que también te falle.

Eres un gran AMIGO y nunca cambies, porque si algo gane a parte de tus conocimientos muy sabiamente transmitidos fue tu AMISTAD!

Me queda aclarar que este trabajo de tesis lo desarrolle en el laboratorio de Posgrado en Bioprocesos de la planta piloto en la UPIBI, bajo la dirección del Dr. Luis Torres.

M. en I. Felipe López Sánchez, le estoy completamente agradecido por todo el apoyo que recibí de usted desde el primer día en que lo conocí. Sus conocimientos son invaluable, su amistad, su preocupación por el bienestar de todos sus alumnos y su paciencia para explicar. Su gusto por la docencia y transmisión del conocimiento hicieron en mí una persona más abierta al diálogo y al aprendizaje. Gracias por todo Maestro!

No me olvido de todos mis profesores ya que cada uno de ellos fue clave elemental, en la cual se cubrieron mis expectativas al ingresar a esta Maestría.

No cabe duda que gracias a todos ustedes mis profesores corroboro el lema:

¡LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA!

DEDICATORIA

A MIS TRES GRANDES AMORES:

KARO

ZA GABY

GABY

*QUE DÍA A DÍA SON MI MEJOR
MOTIVO PARA SEGUIR EN BUSCA
DE UN MÁS ALLÁ.*

*USTEDES SON COMO EL AGUA, EL
AIRE Y LA TIERRA QUE JUNTAS SE
UNEN PARA ALIMENTAR A MI
CORAZÓN.*

LAS AMO!

| | |
|--|-----|
| INDICE | vii |
| INDICE DE TABLAS | ix |
| INDICE DE FIGURAS | x |
| GLOSARIO | xi |
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1 Principales contaminantes involucrados en la contaminación de sitios | 6 |
| 1.2 Principales causas de contaminación de sitios | 6 |
| 1.3 Problemas que enfrenta la gestión de la remediación de sitios contaminados | 7 |
| 1.4 Marco Normativo | 8 |
| CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES | 12 |
| CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN | 17 |
| CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 4.1 Hidrocarburos | 20 |
| 4.1.1 Producción de hidrocarburos | 21 |
| 4.1.2 Diesel | 21 |
| 4.2 Surfactantes | 24 |
| 4.2.1 Anfífilos | 24 |
| 4.2.2 Tensoactivos | 25 |
| 4.2.3 Balance Lipofílico-Hidrofílico (HLB) | 27 |
| 4.2.4 Concentración Micelar Crítica (CMC) | 28 |
| 4.3 Suelos | 31 |
| 4.3.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo | 32 |
| 4.3.1.1 Textura | 33 |
| 4.3.1.2 Heterogeneidad | 37 |
| 4.3.1.3 Densidad real | 37 |
| 4.3.1.4 Densidad aparente | 37 |
| 4.3.1.5 Permeabilidad | 37 |
| 4.3.1.6 pH | 37 |
| 4.3.1.7 Humedad | 38 |
| 4.3.1.8 Materia Orgánica | 38 |
| 4.3.1.9 Capacidad de Intercambio Catiónico | 38 |
| 4.3.10 Interacciones Complejas | 40 |
| 4.3.11 Salinización | 41 |
| 4.3.12 Metales Pesados | 42 |
| 4.3.4 Suelos contaminados con hidrocarburos | 43 |
| 4.3.3 Mecanismos de transporte del contaminante en el suelo | 45 |
| 4.3.4 Remediación de suelos contaminados | 48 |
| 4.3.5 Biorremediación | 48 |

| | |
|---|----|
| 4.4 Lavado de suelos <i>in situ</i> | 49 |
| CAPÍTULO 5. OBJETIVOS | 52 |
| 5.1 Objetivo general | 53 |
| 5.2 Objetivos específicos | 53 |
| CAPÍTULO 6. MATERIALES Y MÉTODOS | 54 |
| 6.1 Muestreo del suelo | 55 |
| 6.2 Caracterización fisicoquímica del suelo | 55 |
| 6.2.1 Textura | 55 |
| 6.2.2 Densidad real | 58 |
| 6.2.3 Densidad aparente | 59 |
| 6.2.4 Porosidad | 59 |
| 6.2.5 pH | 59 |
| 6.2.6 Humedad | 60 |
| 6.2.7 Materia Orgánica | 60 |
| 6.3 Contaminación del suelo | 61 |
| 6.4 Lavado del suelo sin contaminar y contaminado | 62 |
| 6.5 Tiempo de lavado | 63 |
| 6.6 Elección del mejor surfactante para la remoción de diesel | 64 |
| 6.7 Determinación de metales | 66 |
| 6.8 Cuantificación de hidrocarburos | 66 |
| 6.9 Diseño de la columna | 66 |
| 6.10 Lavado en columnas | 67 |
| CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIONES | 69 |
| 7.1 Propiedades fisicoquímicas | 70 |
| 7.2 Hidrocarburos presentes en el suelo | 73 |
| 7.3 Lavados de suelos en viales para elegir el mejor surfactante | 75 |
| 7.4 Elección del mejor tensoactivo | 77 |
| 7.5 Efecto de la adición de sales | 78 |
| 7.6 Eficiencia de lavado como una función del tiempo | 80 |
| 7.7 Efecto de la concentración en la remoción de TPH's | 82 |
| 7.8 Efecto de la velocidad de alimentación y concentración de la disolución | 83 |
| 7.9 Efecto del lavado con agua y un biosurfactante | 85 |
| CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES | 87 |
| CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES | 91 |
| CAPÍTULO 10. REFERENCIAS | 93 |
| ANEXO A. Lavado de suelos | 99 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Normas Oficiales y Normas Ambientales. Remediación de sitios contaminados. | 10 |
| Tabla 2. Productos que se pueden obtener del petroleo. | 21 |
| Tabla 3 Producción de Petrolíferos y Petroquímicos (SNER 2011). | 22 |
| Tabla 4. Propiedades Fisicoquímicas del Diesel. | 23 |
| Tabla 5. Características de algunos de los surfactantes empleados en este estudio. | 30 |
| Tabla 6. Diferentes clases texturales del suelo. | 34 |
| Tabla 7. Clasificación de partículas del suelo | 34 |
| Tabla 8. En la fase líquida, el radio del ión hidratado es considerablemente mayor que el del ión deshidratado. | 41 |
| Tabla 9. Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante. | 43 |
| Tabla 10. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo. | 44 |
| Tabla 11. Cálculos para obtener el porcentaje de materia orgánica. | 61 |
| Tabla 12. Tensoactivos utilizados en el lavado en viales. | 64 |
| Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas del suelo utilizado en este estudio. | 71 |
| Tabla 14. Textura del suelo sin contaminar. | 72 |
| Tabla 15. Metales presentes en una muestra de suelo sin contaminar. | 73 |
| Tabla 16. Hidrocarburos Totales del petróleo presentes en el suelo. | 74 |
| Tabla 17. Surfactante elegido para el lavado de suelos contaminados con Diesel. | 77 |
| Tabla 18. Eficiencias de remoción respecto al tiempo, a una concentración del 0.1 por ciento y una velocidad de alimentación de 5 mL/min. | 81 |
| Tabla 19. Efecto de la concentración de Texapon N-40. | 83 |
| Tabla 20. Remoción de HTP's a diferentes concentraciones de Texapon N-40 a una velocidad de 10 mL/min. | 84 |
| Tabla 21. HTP's removidos a una velocidad de alimentación de 5 mL/min, con agua Texapon 40 y algarrobo al 0.1por ciento. | 85 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999. | 18 |
| Figura 2. Clasificación de los surfactantes | 27 |
| Figura 3. Mallas de acero inoxidable utilizadas en diferentes pruebas realizadas. | 55 |
| Figura 4. Método de la probeta para determinar la textura del suelo. | 56 |
| Figura 5. Contaminación artificial del suelo con diesel. | 62 |
| Figura 6. Lavado de suelos en viales en agitador INO-650 M. | 65 |
| Figura 7. Suelo lavado y llevado hasta sequedad total. | 65 |
| Figura 8. Equipo de reflujo Soxhlet. | 66 |
| Figura 9. Columna de acrílico, diseñada para realizar lavados <i>in situ</i> . | 69 |
| Figura 10. Columnas empacadas con suelo contaminado. | 70 |
| Figura 11. Triángulo de texturas. | 71 |
| Figura 12. Cromatograma general para los HFM en un suelo contamiando con diesel. | 75 |
| Figura 13. Tensoactivos contra remoción de diesel (%). | 76 |
| Figura 14. Lavado de suelos a diferentes concentraciones de disolución. | 77 |
| Figura 15. Eficiencias de remoción de Texapon como una función de la concentración de sales. | 79 |
| Figura 16. Eficiencias de remoción de HTP's como una función del tiempo. | 80 |
| Figura 17. Efecto de la concentración en la remoción de Diesel. | 82 |
| Figura 18. HTP's removidos como una función de la concentración y flujo de alimentación. | 83 |
| Figura 19. Efecto de la velocidad de alimentación vs concentración de surfactante. | 85 |

GLOSARIO

Biorremediación. Describe una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos.

Concentración Micelar Crítica (CMC). Es la concentración de soluto a la cual las micelas se empiezan a formar.

Diesel. Es la fracción del petróleo que es destilada en un intervalo de temperatura de 202 – 306 °C. Su composición puede ser lineal o aromática, varía con átomos de carbonos de C10 – C19.

Hidrocarburos. Son compuestos de origen orgánico, más densos que el agua, se extraen de la superficie terrestre siendo sus proporciones de carbono, hidrogeno, oxígeno, azufre y algunos metales diferentes.

In situ. En el sitio o en el lugar.

Remediación. Es la acción de remediar o estar trabajando en el sitio.

Solución. Comúnmente es un líquido que disuelve a un soluto.

Soluto. Es la cantidad de un compuesto disuelto en un solvente, expresado normalmente en masa/masa, masa/volumen o volumen/volumen.

Suelo. Se define como aquel material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

Suelo contaminado. Es aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos o materiales extraños que por sus cantidades y características afectan la naturaleza del suelo.

Surfactantes. Son moléculas que tiene una doble afinidad debido a que tienen una cabeza hidrofílica (polar) y una cola hidrofóbica (no polar).

Tensoactivos. Es una substancia capaz de modificar la tensión superficial de los líquidos a los que se añade.

Resumen

En México, las actividades industriales han provocado serios daños al medio ambiente afectando en gran medida a los suelos incluyendo a todos los ecosistemas. Las actividades que más han dañado al ambiente son la actividad minera, industria química, petroquímica, refinación del petróleo, entre otras que han generado cantidades muy grandes de residuos peligrosos. La remediación de suelos contaminados se puede realizar por lavados *in situ*, la cual es una técnica que requiere que se perforen pozos y se haga pasar una solución para lograr la remoción del contaminante.

En este caso de estudio se contaminó un suelo Franco-Arenoso con Diesel Fuel a una concentración de 30,000 mg/kg suelo seco. Se realizaron lavados en viales con 13 diferentes surfactantes sintéticos y 3 biosurfactantes a una concentración de 0.5 y 0.1 por ciento v/v respectivamente. Las mejores remociones fueron del 51 por ciento para el surfactante sintético (Texapon N-40), siendo la concentración del suelo después de dos meses de contaminado de 24,762 mg HTP's/kg suelo seco. Para el Algarrobo la remoción fue del 47 por ciento equivalente a 11,745 mg HTP's/kg suelo seco.

Se realizaron lavados en columnas de acrílico de 725 cm³ a diferentes tiempos, concentración de solución y velocidades de alimentación (5 y 10 mL/min). La mejor remoción fue del 39.8 por ciento (9,955.27 mg HTP's/kg suelos seco) a una concentración del 0.05 por ciento para el caso del Texapon N-40 a una velocidad de alimentación de 10 mL/min por 72 h.

El lavado de suelos contaminados asistido con surfactantes y biosurfactantes es una tecnología que requiere que se profundice en el estudio de algunas o ciertas variables como son el tipo de surfactante, concentración, velocidad de alimentación, tiempo de lavado, fenómenos de difusión, desorción, propiedades termodinámicas, entre otros. Los cuales determinan el éxito o fracaso de la técnica empleada.

Abstract

In Mexico, industrial activities have caused serious environmental damage greatly affecting soil including all ecosystems. The activities that have damaged the environment are mining, chemical, petrochemical, oil refining, among others that have generated very large quantities of hazardous wastes. The remediation of contaminated soils can be performed by *in situ flushing*, which is a technique that requires wells to be drilled and then passing a solution to achieve the removal of the contaminant.

In this case study was contaminated sandy loam soil with Diesel Fuel at a concentration of 30,000 mg / kg dry soil. Washes were performed in vials with 13 different synthetic surfactants and biosurfactants 3 at a concentration of 0.5 to 0.1 percent v/v respectively. The best removals were 51 Percent for synthetic surfactant (Texapon N-40), the concentration of the soil after two months of polluted HTP's 24.762 mg/kg dry soil. Algarrobo for removal was 47 percent equivalent to 11.745 mg HTP's/kg dry soil.

Lavages were performed on columns of acrylic 725 cm³ at different times, solution concentration and flowing speeds (5 and 10 mL/min). The best removal was 39.8 percent (9,955.27 mg PAH's / kg dry soil) at a concentration of 0.05 percent for the case of Texapon N-40 at a flow rate of 10 mL/min for 72h. The contaminated soil washing assisted with surfactants and biosurfactants is a technology that requires an in-depth study of some or certain variables such as the type of surfactant, concentration, flow rate, washing time, diffusion phenomena, desorption, properties thermodynamic, among others. Which determine the success or failure of the technique.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

En todo el país existen problemas de contaminación en aire, aguas y suelos aún no cuantificados con precisión. Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de los Hidrocarburos Totales del Petróleo denominados comúnmente como (HTP's) y sus fracciones del petróleo como el diesel y gasolinas. Los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles.

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos. El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido.

De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

Las entidades más afectadas por las emergencias ambientales son Veracruz, Tamaulipas, Oaxaca, Hidalgo, Puebla, Guanajuato, San Luis Potosí, Jalisco, Tabasco y Coahuila.

Las carreteras donde más ocurren volcaduras de carros tanque son, por orden de importancia: Carapan –Playa Azul, México – Cd. Cuauhtémoc, Tampico – Sánchez Román, México – Nogales y Pachuca – Tuxpan.

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales.

Conforme avanzó la industrialización del país, la problemática de la contaminación y del deterioro de diversos sitios creció de manera importante. La contaminación no solo ocurrió en algunas áreas de explotación de recursos naturales (por ejemplo petróleo o minería) sino también en áreas industriales.

Con respecto a este último tipo de sitios contaminados, hay dos aspectos que aumentaron los riesgos para la población:

- i) Las antiguas zonas industriales han sido integradas a las manchas urbanas conforme éstas se expandieron y
- ii) La degradación de estas áreas condujo al abandono, por parte de la industria, de dichas zonas, al migrar a nuevos parques industriales con mejor infraestructura y oportunidades.

Estos procesos urbanos han llevado al deterioro de distintos aspectos del uso del suelo, como por ejemplo, el valor económico de los predios y las condiciones ambientales, urbanas y sociales de dichas áreas. Este fenómeno se observa en las antiguas áreas industriales de los núcleos poblacionales más importantes del país como son Monterrey, Guadalajara, Chihuahua o la Ciudad de México.

La contaminación y la degradación de sitios es particularmente problemática porque no solo afecta el uso sustentable del suelo y el desarrollo urbano, sino que también afecta la salud de la población, y en muchos casos, impacta negativamente a recursos naturales estratégicos y fundamentales para el desarrollo como lo es la disponibilidad de agua para el consumo humano, incluyendo la degradación del campo.

En México, las actividades industriales han provocado serios daños al medio ambiente afectando casi a la totalidad de los ecosistemas.

1.1 Principales contaminantes involucrados en la contaminación de sitios

- a. Hidrocarburos o productos derivados del petróleo. Se dan en sitios donde se realizan o realizaron actividades vinculadas a la producción petrolera en los que se encuentran hidrocarburos en general y sustancias orgánicas asociadas a ellos.
- b. Metales y metaloides (Plomo, Cadmio, Mercurio, Arsénico, entre otros). Se dan en sitios donde se realizaron o realizan actividades mineras y en los cuales se generan diversos tipos de residuos como jales, escorias de fundición (masivas y granulares), patios de lixiviación, polvos y cenizas (calcinas) que en algunos casos son tóxicos por sus propiedades físicas y químicas.
- c. Hidrocarburos halogenados: Se dan en sitios industriales en los que se manejaron solventes y desengrasantes y otros productos halogenados como Tricloroetano TCE, Dicloroetano DCE o Pentaclorobenceno PCB (antiguos transformadores), Compuestos Orgánicos Persistentes (COP's), Plaguicidas y Bifenilos Policlorados BPC's

1.2 Principales causas de contaminación de sitios

- a. La disposición inadecuada de residuos peligrosos en terrenos baldíos, bodegas, almacenes e instalaciones industriales.
- b. Las fugas de materiales peligrosos (en especial los hidrocarburos y sus derivados) de tanques y contenedores subterráneos.
- c. Las fugas de materiales peligrosos (en especial los hidrocarburos y sus derivados) de tuberías y ductos.

- d. La lixiviación de residuos peligrosos en sitios de almacenamiento y en sitios donde se desarrollan actividades de manejo de residuos peligrosos.
- e. Los derrames de sustancias químicas por accidentes de transporte.
- f. Disposición inadecuada de residuos peligrosos o sólidos contaminados con éstos en los sitios de disposición final para residuos sólidos urbanos.

Se pueden mencionar de manera cualitativa los problemas de contaminación que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras, uso de agroquímicos, fertilizantes y pesticidas en sus etapas de extracción como en las de procesamiento de los materiales obtenidos.

1.3 Problemas que enfrenta la gestión de la remediación de sitios contaminados

- a. Carencia de recursos financieros para la remediación de sitios contaminados.
- b. Falta de interés en la recuperación y revitalización de sitios contaminados.
- c. Falta de interés en la renovación urbana que integre la remediación de sitios contaminados.
- d. Los problemas derivados de las relaciones de posesión de predios.
- e. Carencia de un inventario/diagnóstico completo sobre los sitios contaminados (número y ubicación).
- f. Desconocimiento de las autoridades municipales y el mercado inmobiliario de las ventajas de la remediación y reutilización de sitios contaminados.

Una parte de la problemática de la contaminación de sitios está ligada a

- a. Disposición inadecuada de residuos peligrosos (directa).
- b. Descargas de aguas que contienen residuos peligrosos (directa).

- c. Disposición de residuos sólidos que contienen residuos peligrosos en instalaciones o en áreas sin infraestructura adecuada (directa).
- d. Ubicación no homogénea y suficiente de infraestructura para el manejo de residuos peligrosos a nivel nacional (directa).
- e. Falta de cultura ambiental con respecto a las consecuencias de la mala disposición de los residuos peligrosos por parte de la sociedad, gobiernos locales e industria (indirecta).
- f. Procesos industriales que tienen corrientes de subproductos sin valor de recuperación (indirecta).
- g. Actividades privadas, públicas y de servicios que generan residuos peligrosos a nivel doméstico o a baja escala sin sistemas eficientes de recolección, reciclaje y disposición final (indirecta).
- h. Incremento en la generación de residuos peligrosos debido al aumento de la actividad económica y el crecimiento demográfico sin un aumento en la eficiencia de recuperación, reciclaje y reutilización de residuos en las cadenas productivas (indirecta).
- i. Esquemas de vigilancia y control insuficiente en cuanto al manejo y disposición de residuos peligrosos y en cuanto al cierre de operación (indirecta).

1.4 Marco Normativo

Las causas que contribuyeron a la contaminación y abandono de los sitios se debieron a la carencia de un marco regulativo antes de 2004 y en particular antes de 1988, en las cuales se incluye el siguiente listado:

- a. Remediación de sitios contaminados.

- b. Responsabilidad por la reparación de daños y la remediación.
- c. Avisos y responsabilidades antes y durante el cierre de operaciones.
- d. Control sobre las transferencias (compra – venta) de sitios contaminados.
- e. La generación y disposición de residuos peligrosos sin control ni vigilancia.
- f. La intrincada situación jurídica en lo referente a la posesión o propiedad de muchos sitios.
- g. El cierre de operaciones y actividades sin regulación de algún tipo.
- h. El crecimiento desordenado de las áreas urbanas.

Todo ello condujo a que en el proceso de cierre de operaciones, se abandonaran sitios altamente contaminados en especial aquellos donde se encuentran presentes grandes cantidades de residuos.

Después de la publicación y entrada en vigor de La Ley General para la Prevención y Gestión de los Residuos (LGPGIR) en 1988 se trabajó en la elaboración de su Reglamento, el cual fue publicado el 30 de noviembre de 2006.

En el mismo periodo se publican otras Normas Oficiales Mexicanas (Tabla 1) como son: la NOM 138 SEMARNAT/SS 2003 (Tema: Hidrocarburos en suelos), la NOM 147 SEMARNAT/ SSA1 2004 (Tema: Metales Pesados y Metaloides en suelos) y diversas Normas Mexicanas (NMX´s) como la NMX-AA-132-SCFI-2006 (para muestreo de sitios contaminados con metales y metaloides), la NMXAA-134-SCFI-2006 (métodos de análisis químicos de hidrocarburos Fracción Pesada), NMX-AA-141SCFI-2006 (métodos de análisis químicos de hidrocarburos Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos BTEX) y la NMX-AA-105-SCFI-2007 (métodos de análisis químicos de hidrocarburos de la Fracción Ligera).

Tabla 1. Normas Oficiales y Normas Ambientales. Remediación de sitios contaminados.

| Norma | Tema |
|---------------------------|--|
| NOM-052- SEMARNAT-2005 | Residuos Peligrosos |
| NOM-133-SEMARNAT-2000 | Bifenilos policlorados |
| NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 | Hidrocarburos en suelos |
| NOM-141-SEMARNAT-2003 | Jales Mineros |
| NOM-147-SEMARNAT/SS-2004 | Metales pesados y metaloides |
| NMX-AA-132-SCFI-2006 | Muestras de suelos contaminados con metales pesados y metaloides |
| NMX-AA-134-SCFI-2006 | Análisis químicos de muestra de suelos con hidrocarburos fracción pesada |
| NMX-AA-141-SCFI-2006 | Análisis químicos de muestra de suelos con BTEX |
| PROY-NMX-AA-105-SCFI-2007 | Análisis químicos de muestra de suelos con hidrocarburos fracción ligera |

Fuente: Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados.

Los principios rectores de la política que se definen en materia de remediación de sitios contaminados, (con base en las fracciones I, II, III, IV, X del artículo 2, así como en los artículos 68, 69 y 70 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos) son:

- i) la prevención de la contaminación de los recursos naturales,
- ii) la remediación de los sitios contaminados con materiales y residuos peligrosos y la reutilización de los sitios remediados en el marco de una gestión integral, responsable y en la cual se aplican los principios de “El que contamina paga”,
- iii) la responsabilidad solidaria en la reparación de daños y en la ejecución de la remediación,
- iv) la recuperación del valor ambiental, social y económico de los recursos naturales dañados y

v) la reintegración de los sitios remediados al desarrollo sustentable del país y de las regiones o ciudades donde se encuentran.

Las principales instancias involucradas en la gestión de la remediación de sitios contaminados son la SEMARNAT, PROFEPA, CONAGUA, COFEPRIS, INE-CENICA, Universidades y por motivos presupuestales la SHCP.

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2

Torres, L. G; Iturbe, R; Flores, C; Chávez, C; Ramírez, A. (2004), describieron que la contaminación de suelos por petróleo es un problema muy común en áreas de explotación de hidrocarburos, producción, refinerías, áreas de exploración, e industrias procesadoras del petróleo. Los suelos pueden ser contaminados por altas concentraciones de petróleos crudos y sus fracciones, debido a los problemas que se generan durante el transporte y almacenamiento. Existen diversas técnicas de remediación que pueden ser usadas, pero para suelos contaminados recientemente con altas concentraciones de petróleo requieren de una respuesta rápida mejorando el lavado de suelos con surfactantes siendo probablemente uno de los mejores métodos.

El lavado *in situ* es la inyección o infiltración de una solución acuosa dentro de un suelo contaminado o en aguas subterráneas. Las bajas solubilidades de los compuestos hidrofóbicos hacen que el sistema bombeo-tratamiento sea inefectivo para la remediación de acuíferos donde los contaminantes están presentes como Líquidos Densos en la Fase No Acuosa (DNAPL). Los surfactantes pueden incrementar grandemente la solubilidad de los compuestos hidrofóbicos. El uso de surfactantes mejorados en lavados *in situ* ofrece un incremento en el potencial que incrementa la eficiencia del lavado de suelos, cuando los DNAPL están presentes. El lavado *in situ* puede ser usado para facilitar la remoción de los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PHA's), hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) y fuel Diesel que son adsorbidos y depositados en el suelo. Los exitos de esta técnica pueden ser atribuidos a la capacidad de los surfactantes, a su concentración por encima de la concentración micelar crítica (CMC) donde aumenta la solubilidad acuosa de los compuestos hidrofóbicos orgánicos. El lavado de suelos con surfactantes mejorados puede ser resuelto desde dos distintos mecanismos: uno ocurre a concentraciones bajas de la CMC y la otra ocurre por encima de la solubilización.

El lavado *in situ* puede realizarse por medio de la inyección de pozos, pozos horizontales, zanjas, infiltración, y lixiviación, así mismo la extracción en pozos se realiza en cunetas abiertas, donde la colección se realiza en la superficie en drenajes o zanjas. Esta tecnología puede ser usada en conjunción con otras, como la biodegradación consiguiendo el objetivo de la remediación.

Entre los sucesos críticos del lavado *in situ* existen factores y condiciones de los cuales algunos son de mayor prioridad como el coeficiente de partición, la conductividad eléctrica, el área superficial del suelo, pH del suelo, solubilidad en el agua, y el coeficiente de partición octanol/agua. Algunas de estas características pueden ser obtenidas de la literatura especializada, otros pueden ser medidos experimentalmente o a nivel de campo. La evaluación a nivel laboratorio es necesaria para investigar el tipo y concentración de surfactante a emplear en el proceso de lavado, la velocidad de lavado y la cantidad de contaminante que puede ser migrado del suelo al agua.

Un enfoque progresivo en la implementación en el lavado de suelos contaminados incluye: a) una evaluación inicial de la aplicación, b) caracterización adicional del sitio, c) estudios de laboratorio, d) demostraciones en campo, e) implementación a escala industrial.

El lavado *in situ* es una tecnología relativamente nueva y riesgosa en términos de costos, el daño ambiental es relativamente alto, las demostraciones en campo son relativamente fáciles para aplicaciones de lavados. Estas demostraciones pueden proporcionar mejores datos en la interpretación de sistemas a escala.

Así mismo realizaron una remediación de suelos contaminados en una refinería Mexicana, la concentración inicial promedio de HTP's fue de 55,156 mg/kg suelo. Después de seis semanas de un lavado *in situ* con periodos alternados con agua y

agua-surfactante, obtuvieron una concentración promedio de 1,407 mg/kg, lo cual es equivalente al 98 por ciento de eficiencia.

Shin, K; Kim, K. (2004), realizaron un lavado *in situ* con un biosurfactante (*Pseudomonas aeruginosa*) que es un Ramnolípido y un surfactante sintético Tween 80. Las remociones obtenidas fueron del 70 y 60 por ciento respectivamente. El experimento consistió en una columna de vidrio empacada con suelo, una bomba peristáltica, solución de biosurfactante al 0.3 y 0.5 por ciento peso/volumen, mangueras de Tygon. La velocidad de alimentación fue de 2 y 5 mL/min de abajo hacia arriba haciendo pasar diferentes volúmenes de poro de solución.

Park, S; Bielefeldt, A. (2005). Realizaron estudios con surfactantes no-iónicos (TNP10) para lavar suelos contaminados con pentaclorofenoles (PCP) en la fase líquida no acuosa (NAPLs). Demostraron que con una solución de TNP10 a una concentración de 5 g/L haciendo pasar de 50 a 200 volúmenes de poro removieron del 71-79 por ciento de 200mg/kg de suelo-adsorbido de PCP, compararon la remoción del 0.7-2.0 por ciento sin surfactantes. El lavado lo realizaron en columnas cilíndricas de Plexiglas, la cual empacaron con una capa de grava (5-25 mm) en el fondo de 5 cm de altura y posteriormente con arena a una altura de 9-12 cm, la cual fue distribuida cada 2.5 cm con una pesa de 500 g. La eficiencia de PCP removidos después de realizar el lavado con una bomba peristáltica a diferentes velocidades de alimentación 0.4, 0.5 y 2.0 mL/min fue cercana al 100 por ciento.

Torres, L. G; Climent, M; Saquelares, J; Bandala, R; Urquiza, G; Iturbide. R. (2007), caracterizaron un suelo contaminado (40 kg) con hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) en una zona petrolera en Tabasco México. Las concentraciones iniciales de TPH's se encontraron en el intervalo de 51,550 a 192,130 mg/kg; para lo cual se

utilizaron pruebas de lavado con dodecil sulfato de sodio y sales, con lo cual se obtuvieron remociones de hasta un 49.5 por ciento.

Lee, D; Ryu, J; Kim, E. (2003). Seleccionaron un suelo arenoso de Ottawa para modelar una contaminación artificial con Tolueno que es un hidrocarburo aromático no clorado completamente soluble en solventes orgánicos. Utilizaron un surfactante aniónico Disulfonato oxido de difenilo de sodio (DOSL) al 4 por ciento v/v, en el cual se obtuvieron remociones de hasta el 92 por ciento; al utilizar el DOSL y NaOH.

Lee, M; Kang, H; Do, W. (2005). Remediaron con lavados *in situ* un suelo contaminado con diesel en una zona militar de Korea con 45 años de uso vehicular. La concentración inicial fue de 20000 mg/kg removiendo el 88 por ciento obteniendo una concentración final de 1761 mg/L. El lavado lo realizaron con monoelato de sorbitan a una concentración de 5mg/L.

JUSTIFICACIÓN

CAPÍTULO 3

Diversos procesos urbanos han llevado al deterioro del suelo, debido principalmente a derrames de hidrocarburos (gasolina y diesel), disposición inadecuada de residuos peligrosos, degradación de predios industriales y la disposición inadecuada de residuos mineros (Figura 1).

Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 toneladas de hidrocarburos (crudo, diesel y gasolina) su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX 2001).

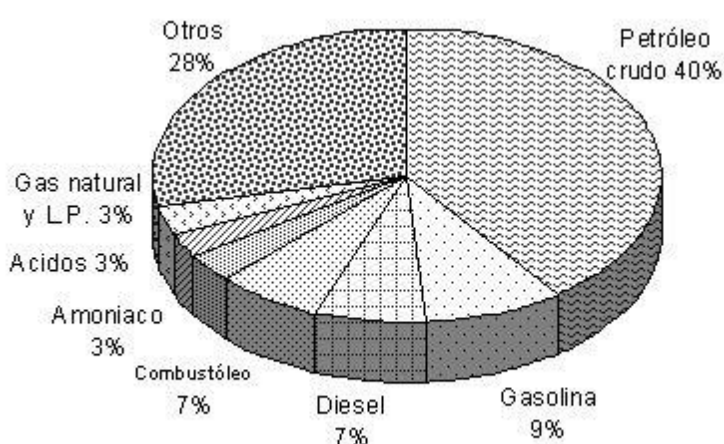


Figura 1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999.
Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 2007.

El diesel es uno de los principales contaminantes del suelo, participando con un 7 por ciento a nivel nacional.

Es por eso que surge la necesidad de emplear diversas técnicas como el lavado *in situ* que contribuyan al saneamiento y recuperación de suelos contaminados, en lapsos breves de tiempo a los menores costos posibles, evitando problemas secundarios de contaminación.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 4

4.1 Hidrocarburos

El petróleo es un compuesto de origen orgánico, más denso que el agua, se extrae de la superficie terrestre. La composición de los crudos varía dependiendo del lugar donde se han formado. Las diferencias entre unos y otros se deben, a las distintas proporciones de carbón, nitrógeno, hidrogeno, oxígeno, azufre y algunos metales.

En numerosas ocasiones se utiliza la palabra crudo para denominar al petróleo sin refinar. Los hidrocarburos se dividen en: alifáticos, cíclicos y aromáticos. El carácter de aromaticidad se debe a la existencia de dobles enlaces conjugados en anillos cíclicos. Son saturados los hidrocarburos alifáticos cuyos átomos de carbono están unidos entre sí por enlaces sencillos. Cuando se unen mediante dobles o triples enlaces son hidrocarburos no saturados. Otra clasificación de los alifáticos (kerosén, gasolina, nafta, diesel fuel), aromáticos (benceno, tolueno, xileno) y halogenados (tetracloruro de carbono, cloroformo, tricloroetano). Se encuentran en diversos productos de uso común como combustibles, pinturas, removedores, liquido para encendedor, thinner, solventes, lubricantes, plaguicidas, pegamentos, entre otros.

Los hidrocarburos se producen por destilación del petróleo (Tabla 2).

El gran número de hidrocarburos moleculares presentes en el petróleo dificulta mucho las tareas de separación e identificación de sus componentes. Se han realizado análisis alcanzando el aislamiento y la identificación de aproximadamente 175 hidrocarburos.

Estos compuestos aislados representan solamente alrededor de 50% y son principalmente hidrocarburos de puntos de ebullición bajos. De los 175 hidrocarburos aislados, 108 son compuestos alifáticos saturados, mientras que 57 son aromáticos.

Tabla 2. Productos que se pueden obtener del petróleo.

| | Producto | Intervalo de temperatura ebullición (°C) | Aplicaciones |
|--------------------------|------------------|--|--|
| Fraciones Ligeras | Gas de refinería | <20 | Combustible para la refinería |
| | GLP | <20 | Calefacción doméstica e industrial |
| | Gasolina | 40-150 | Carburante para automóviles |
| | Nafta pesada | 150-200 | Materia prima para productos químicos, disolventes. |
| Fraciones Medias | Queroseno | 170-250 | Lámpara de alumbrado carburante para turborreactores |
| | Gas Oil | 250-320 | Carburantes para motores diesel, calefacción doméstica |
| Fraciones Pesadas | Fuel Oil ligero | 340-400 | Combustible para buques, locomotoras, etc. |
| | Fuel Oil pesado | 400-500 | Materia prima para lubricantes, ceras, cremas y aceites. |
| | Asfalto | >500 | Pavimentación, techado, impermeabilización, etc. |

Fuente: Principios de Recuperación (1999).

4.1.1 Producción de hidrocarburos.

La elaboración de diesel en el primer semestre del 2011 (SENER 2011) fue de 274.2 miles de barriles diarios, cifra menor en 10.2% al volumen correspondiente a los primeros seis meses de 2010. La de Pemex Diesel fue 185.8 miles de barriles diarios, 22% inferior a la del mismo periodo de 2010; y la producción de Pemex Diesel UBA aumentó 33.2% al alcanzar 88.3 miles de barriles diarios (Tabla 3).

4.1.2 Diesel

El Diesel Fuel es la fracción de petróleo que es destilada después del queroseno (202–306 °C). La composición del Diesel Fuel contiene cadenas alifáticas saturadas y

fracciones aromáticas de diez a diecinueve átomos de carbono (C₁₀ – C₁₉) que son conformadas por parafinas, cicloparafinas y grupos aromáticos.

Tabla 3. Producción de Petrolíferos y Petroquímicos (miles de barriles diarios) SNER 2011.

| Concepto | Datos anuales | | | | | Enero-Junio | | |
|--------------------------------------|---------------|---------|---------|---------|-----------|-------------|-------------------|---------------------|
| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | Meta 2011 | 2010 | 2011 ^b | Variación anual (%) |
| Total petrolíferos | 1511.4 | 1409.1 | 1523.9 | 1415.8 | 1598 | 1481.1 | 1385.1 | -6.5 |
| En el SNR | 1312.4 | 1306.9 | 1342.7 | 1229.1 | 1408.7 | 1292.1 | 1192.8 | -7.7 |
| Gas licuado | 26.6 | 25.9 | 27.1 | 25.5 | 26.9 | 26.8 | 19.6 | -26.9 |
| Gasolinas | 456.4 | 450.7 | 471.5 | 424.2 | 501 | 448.1 | 405.9 | -9.4 |
| Pemex Magna | 425.7 | 418.7 | 364 | 341.2 | 361.3 | 350.1 | 333.4 | -4.8 |
| Pemex Magna UBA | --- | --- | 81.8 | 67.3 | 90 | 78.7 | 57.8 | -26.6 |
| Pemex Premium | 26.1 | 25.4 | 22.7 | 12.5 | 49.2 | 15.2 | 13.3 | -12.5 |
| Otras gasolinas | 4.6 | 6.6 | 3.1 | 3.1 | 0.5 | 4.1 | 1.4 | -65.9 |
| Diesel | 334 | 343.5 | 337 | 289.5 | 385.2 | 305.3 | 274.2 | -10.2 |
| Pemex Diesel | 326.2 | 336.1 | 291.4 | 221 | 285.2 | 238.3 | 185.8 | -22.0 |
| Pemex Diesel UBA ^a | --- | --- | 44.5 | 67.7 | 96.2 | 66.3 | 88.3 | 33.2 |
| Otros | 7.8 | 7.4 | 1 | 0.8 | 3.8 | 0.7 | 0.1 | -85.7 |
| Combustóleo | 301.5 | 288.7 | 316.2 | 322.3 | 286.4 | 332.5 | 309.1 | -7 |
| Otros Petrolíferos | 193.9 | 198.1 | 190.9 | 167.7 | 209.3 | 179.3 | 184 | 2.6 |
| En los complejos procesadores de gas | 199 | 182.5 | 180.6 | 184.2 | 186.2 | 186.7 | 189.3 | 1.4 |
| Gas licuado | 198.9 | 182.4 | 180.6 | 184.2 | 186.2 | 186.7 | 189.3 | 1.4 |
| Combustóleo | 0.1 | 0.1 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| En los complejos petroquímicos | --- | 0.8 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 0.6 | 20 |
| En Pemex-Exploración y Producción | --- | --- | --- | 1.9 | 2.3 | 1.9 | 2.3 | 21.1 |
| Petroquímicos (miles de toneladas) | 15030.2 | 14856.8 | 14887.1 | 15650.7 | 17512.7 | 8044.9 | 7952.5 | -1.1 |
| Básicos | 6410.8 | 5941.5 | 6187.8 | 6801.2 | 7456.4 | 3403.4 | 3413.8 | 0.3 |
| Desregulados | 8619.4 | 8915.3 | 8699.2 | 8849.5 | 10056.3 | 4538.7 | 4538.7 | -2.2 |

a En Enero del 2009 inició la producción del combustible PEMEX Diesel UBA

b Cifras preliminares

Fuente: SENER 2011

El diesel está compuesto esencialmente de n-alcános (65-85 por ciento) cadenas lineales y ramificadas (parafinas), cicloalcános, hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) 10 – 30 por ciento, azufre, entre otros (Tabla 4).

Algunos derivados del petróleo son usados en la industria y en el transporte (gasolina y diesel). Durante el transporte y uso de estos materiales se liberan accidentalmente al suelo y a las aguas subterráneas representando una gran amenaza al ambiente.

A menudo, los derrames de diesel se extienden a lo largo de distancias considerables y se desplazan verticalmente en sentido descendente contaminando aguas subterráneas. La difusión del diesel hacia la materia orgánica e inorgánica del suelo está en función de cada especie química presente en la mezcla, como sucede con su difusión hacia la fase vapor.

Los derrames de hidrocarburos, por las sustancias que involucran, pueden poner en peligro los lugares donde se producen, la integridad de los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003). Cuando los derrames de hidrocarburos permanecen sin ser atendidos causan daños al suelo y al hábitat que de él depende.

Tabla 4. Propiedades Fisicoquímicas del Diesel.

| Propiedades | Diesel |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Composición | C10- C19 HC |
| Carbono | 86.5 % |
| Azufre | 0.05 % máximo |
| Agua | 161 ppm |
| Oxígeno | 0 % |
| Hidrógeno | 13 % |
| *Índice de Cetano | 40-55 |
| Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) | 41,860 |
| Viscosidad Cinemática (40°C) | 1.3 – 4.1 mm ² /s |
| Punto de inflamación | 60 – 80 °C |
| Punto de ebullición | 188 – 343 °C |
| Gravedad específica (60°F) | 0.85 kg/L |
| Relación aire/combustible | 15 |

*Mide la calidad de ignición de un diesel.

Fuente: Sarmiento, R. (2008).

4.2 Surfactantes.

La extracción de soluciones acuosas con o sin aditivos son empleadas para solubilizar los contaminantes adsorbidos al suelo. La solubilidad en agua es el mecanismo que controla la remoción, los aditivos son usados para mejorar las eficiencias de remoción. Estos aditivos pueden reducir el tiempo o tratamiento a usar en el sitio en comparación con el uso de agua sola. Los aditivos deben de ser de baja toxicidad y biodegradables. Las investigaciones en esta área han sido enfocadas principalmente a compuestos orgánicos volátiles (COV's) y se han limitado completamente a la remoción de metales. Los aditivos incluyendo a los surfactantes, ácidos orgánicos e inorgánicos, hidróxido de sodio los cuales pueden disolver la materia orgánica del suelo, el agua con solventes solubles como el metanol desplazan a los cationes, agentes complejos como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), ácidos en combinación con agentes complejos óxido/reducción. Los surfactantes catiónicos, aniónicos, y no iónicos son particularmente para el lavado de suelos (Mulligan, 2001).

4.2.1 Anfífilos

La palabra anfífilo fue construida por Paul Winsor a partir de dos raíces griegas, el prefijo "amphi", significa de ambos lados, doblemente o alrededor, la raíz "philos" que significa amigo de, hidrófilo (amigo del agua).

Anfífilo se usa tanto como sustantivo o adjetivo. La propiedad correspondiente se llama anfipatía del griego "pathos", que indica sentimiento o sufrimiento.

Típicamente un anfífilo tiene una molécula que se puede dividir en dos partes. De un lado una parte polar que tiene afinidad para los solventes polares, particularmente el agua, contiene heteroátomos tales como O, S, N, P, los cuales aparecen en grupos funcionales como alcohol, tiol, éter, éster, ácido, sulfato, sulfonato, fosfato, amina,

amida, entre otros. Un grupo apolar tiene afinidad para los solventes orgánicos, compuestos en general por un hidrocarburo parafínico, cicloparafínico o aromático, el cual puede eventualmente contener halógenos. En ciertos casos particulares la parte apolar puede ser una cadena de silicona o de polióxido de propileno.

Por esta razón la parte polar se denomina también hidrofílica, mientras que a la parte no-polar le corresponde el calificativo de lipofílico o hidrófilico.

Tales condiciones ocurren solamente en la frontera de dos fases. Se llamará superficie la frontera entre una fase condensada y un gas, e interfase la frontera entre dos fases condensadas, es decir dos líquidos, o un líquido y un sólido. Las sustancias anfífilas tienen una fuerte tendencia en migrar hacia una superficie o una interfase (adsorción).

4.2.2 Tensoactivos

La energía libre de Gibbs por unidad de área tiene un efecto significativo en la tensión superficial o interfacial, la cual juega un papel determinante en cuanto a las propiedades fisicoquímicas del medio como por ejemplo la existencia y persistencia de emulsiones o de espumas.

La característica básica de los tensoactivos es su capacidad de modificar la tensión superficial de la superficie de los líquidos a los que se añaden. La doble finalidad de la molécula la obliga a migrar a la superficie del líquido dejando sumergido el grupo hidrófilico o hidrófobico, en función de si el disolvente es polar o no-polar, es decir en el interior de la disolución. Y para una concentración mínima de surfactante (concentración micelar crítica), las moléculas se agrupan en agregados denominados micelas. Este proceso espontáneo minimiza las fuerzas repulsivas entre el solvente y las moléculas de surfactante y maximiza las interacciones atractivas. Si el solvente es polar, tal como el agua, las moléculas de surfactante orientan su cadena apolar hacia el interior de la micela, quedando el grupo polar orientado hacia el exterior. La

tendencia de los tensoactivos a situarse en las interfases tiene enorme importancia en las estructuras biológicas y en procesos tecnológicos. Así cuando el medio líquido existe en fase acuosa y otra fase grasa u orgánica inmiscibles, al añadir el surfactante las moléculas de este se disponen intercaladas en la interfase entre el agua.

Hay que resaltar que no todas las moléculas anfífilas tienen propiedades tensoactivas, aunque sí todas las moléculas tensoactivas han de ser anfífilas. Las propiedades interfaciales intrínsecas de un tensoactivo están determinadas por su estructura, el tamaño de cada uno de los grupos, y su balance hidrófilo/hidrófobo; este último es determinado básicamente por la polaridad de su cabeza. Las moléculas de tensoactivo han de poseer una longitud mínima de cadena hidrófoba, normalmente superior al de ocho átomos de carbonos enlazados, y su carácter hidrófilo debe permitir formar agregados con moléculas de su misma especie. Atendiendo a su estructura y funcionalidad

Un tensoactivo tiene una actividad interfacial y una capacidad de formar agregados micelares.

Denominamos como surfactantes a la actividad de las sustancias en la superficie (surface-active substances).

Los surfactantes son moléculas anfífilas que consisten de una cabeza hidrofílica y una cola hidrofóbica como ya se ha descrito anteriormente. Se han encontrado ingredientes activos en jabones y detergentes con la habilidad de concentrar la interface aire-agua y son comúnmente usados para separar materiales aceitosos de partículas media (Hillel, 2004).

Los surfactantes se clasifican como iónicos y no iónicos con variaciones en su estructura química de acuerdo al grupo hidrófilo (Figura 2). Los surfactantes iónicos

son clasificados de acuerdo a su carga de arrastre cuando son disociados en agua a un pH neutro. Estas clasificaciones son concretamente iónicas (anionicas o cationicas), zwitterionicas o anfotericas.

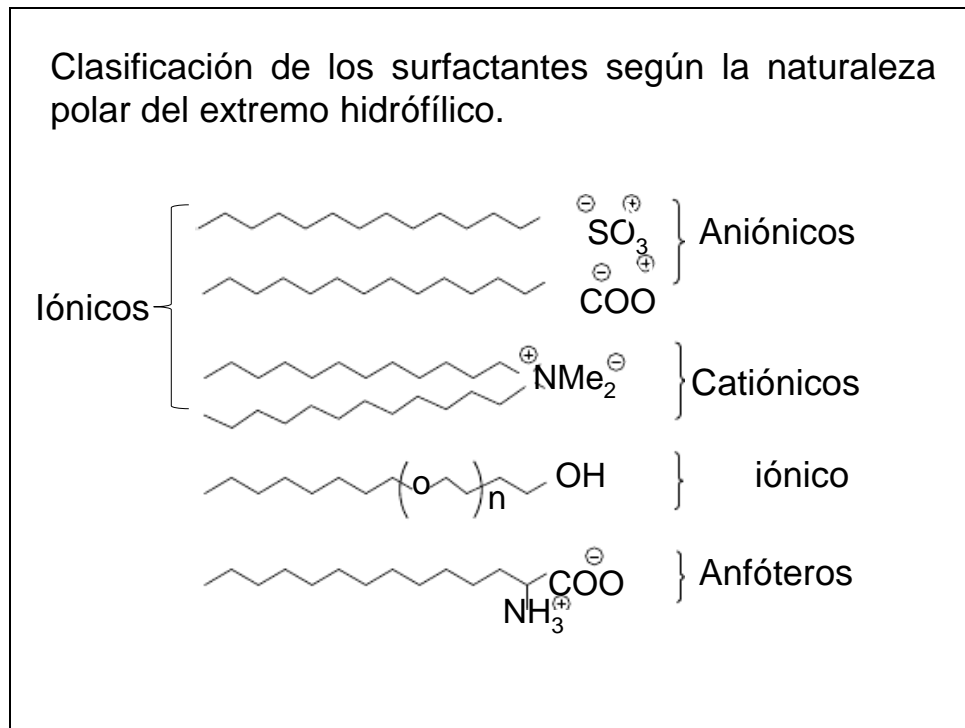


Figura 2. Clasificación de los surfactantes

4.2.3 Balance hidrofílico-lipofílico (HLB)

Los surfactantes tienen la característica de su balance hidrofílico-lipofílico (HLB). Los surfactantes con valores altos de HLB son hidrofílicos y por consiguiente sus moléculas son más solubles en agua, cuando tiene valores bajos de HLB son lipofílicos por lo tanto sus moléculas son más solubles en aceites. El HLB con un valor de 3 a 6 es lipofílico y puede ser utilizado para preparar agua en aceite (w/o) en las emulsiones y los surfactantes con valor de HLB de 10 a 18 son más hidrofílicos. Los surfactantes con una mayor HLB (Tween 80, Tween 60 y Tween 20) resultan en una mejor solubilidad.

Los surfactantes incrementan la solubilidad acuosa de la fase líquida no-acuosa (NAPLs) para reducir la tensión superficial aire-agua y agua-aceite. Como la tensión interfacial es reducida y la concentración de surfactantes aumenta, los monómeros se agrupan para formar micelas.

Una característica de las moléculas de los surfactantes es su capacidad de formar agregados conocidos como micelas, este fenómeno ocurre al elevar la concentración de los surfactantes.

4.2.4 Concentración Micelar Crítica (CMC)

La concentración a la cual las micelas se empiezan a formar se le conoce como la concentración crítica micelar (CMC). Esta concentración corresponde a los puntos donde los surfactantes primero muestran una tensión superficial baja. Muchas propiedades físicas que caracterizan a los surfactantes dependen de la CMC así como de la formación de emulsiones, solubilidad del aceite, formación de espumas, tensiones superficiales e interfaciales. Estas propiedades pueden ser utilizadas para evaluar el surfactante adecuado para la remediación de suelos.

Algunos autores han reportado que al incrementar los grupos alquilo de los hidrocarburos, incrementa la CMC de los surfactantes, dependiendo de la longitud de los alquilos, la CMC de los surfactantes no-iónicos es aparentemente dos veces menor que la de los surfactantes iónicos. Generalmente, al incrementar la temperatura disminuye la CMC de algunos surfactantes no-iónicos, pero incrementa la solubilidad de los surfactantes iónicos. La adición de sales puede reducir la CMC de los surfactantes iónicos.

La adición de surfactantes eleva la CMC dando como resultado la formación de micelas; por ejemplo la concentración del surfactante extramicelar (la actividad acuosa

del surfactante) es constante y esta por arriba de la CMC. Las micelas tiene un exterior hidrofílico (las cabezas polares están orientadas hacia el exterior de el agregado) y un interior hidrófobico (las colas no-polares son orientadas en dirección al interior del agregado).

Estas micelas son análogas a la dispersión de gotas de aceite. El incremento en la solubilidad acuosa de los compuestos orgánicos es referido a su solubilización debido al incremento en la concentración del surfactante, adicionalmente las micelas son formadas y la solubilidad de los contaminantes continúa incrementándose.

Los mecanismos de movilización ocurren a concentraciones bajas de surfactantes CMC. Los fenómenos asociados a estos mecanismos son la reducción de la tensión superficial e interfacial, reducción de la fuerza de capilaridad, reducción de la mojabilidad y reducción del ángulo de contacto. A concentraciones bajas de la CMC, los surfactantes reducen la tensión superficial e interfacial de los sistemas aire-agua, petróleo-agua y suelo/agua. Los surfactantes en contacto con el sistema suelo/aceite incrementa el ángulo de contacto y reduce las propiedades de la fuerza de capilaridad debido a la reducción de la fuerza interfacial. Debido a la adsorción de los surfactantes en el suelo, los mecanismos de movilización dependen de la carga iónica de los surfactantes. Por lo tanto, la adsorción de los surfactantes en el suelo puede ser muy baja y reducir su concentración, lo cual ocasiona eficiencias bajas e inefectivas en el tratamiento de suelos.

Por encima de la CMC de los surfactantes, la solubilidad de los aceites incrementa dramáticamente debido a la agregación de las micelas de los surfactantes. Consecuentemente, al interior de las micelas se constituye un ambiente compatible para las moléculas orgánicas hidrófobicas; los procesos de incorporación de estas moléculas dentro de las micelas es conocida como solubilización.

Los mecanismos detrás de los surfactantes es mejorar la remoción del contaminante del suelo teniendo como propósito que ocurra en dos pasos la movilización y solubilización.

La actividad de los surfactantes en la superficie causa su acumulación en las interfases sólido-líquido, en la mayoría de los casos la adsorción del surfactante es indeseable. La mayoría de los surfactantes catiónicos son más susceptibles a la adsorción.

Tabla 5. Características de algunos de los surfactantes empleados en este estudio.

| Surfactante | Nombre Químico | Naturaleza Iónica | CMC mg/L | HLB |
|-------------|-------------------------------------|-------------------|----------|------|
| Texapon N40 | Lauril Sulfato de Sodio | Aniónico | 1458 | NR |
| SDS | Dodecil Sulfato de Sodio | Aniónico | 400 | 40 |
| Emulgin 600 | Fenol nonil Etoxilado | No-iónico | 45.06 | 11 |
| Maranil Lab | Dodecil Benceno Sulfato de Sodio | No-iónico | 150 | NR |
| Tween 20 | Monolaurato de Sorbitan Etoxilado | No-iónico | 60.74 | 16.7 |
| Tween 60 | Monoestearato de Sorbitan Etoxilado | No-iónico | NR | 14.9 |
| Tween 80 | Monoleato de Sorbitan Etoxilado | No-iónico | 65.4 | 15 |
| Polafix | Propil-cocoamida | Zwitteriónico | 100 | NR |
| Surfacpol G | NR | Aniónico | NR | NR |

Fuente: Torres (2007)

La precipitación de los surfactantes es otro de los mecanismos que depende de la composición iónica de la superficie del sistema y del surfactante utilizado, la precipitación tiene un impacto muy significativo en la eficacia de los procesos.

De esta fuerte afinidad para las superficies o interfases dependen muchas propiedades de los surfactantes (Tabla 5).

La producción de surfactantes basados en materiales químicos son conocidos como surfactantes sintéticos y los basados en materiales biológicos son llamados biosurfactantes.

4.3 Suelos

Algunos autores lo definen como aquel material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003).

El suelo es un cuerpo natural que conforma el hábitat de bacterias, hongos, levaduras, virus y plantas superiores, entre otros, que sirve para la alimentación de los animales y del hombre a través de los ciclos tróficos.

El suelo y los microorganismos mantienen los sistemas ecológicos, ya que le aportan componentes químicos y minerales (como resultado de la biodegradación); y complejos orgánicos como ácidos húmicos y fúlvicos, enzimas, vitaminas, hormonas y antibióticos; además, albergan una rica reserva genética.

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico así como nutrientes para el crecimiento de plantas y micro-organismos.

La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. El suelo es de vital importancia para sustentar la vida y las actividades económicas de un país y debe protegerse para evitar su degradación y su contaminación.

La contaminación del suelo conduce a la pérdida de los valores económicos, culturales y ambientales asociados al uso del suelo, por ejemplo, si se contamina el suelo de un

predio, disminuyen considerablemente o desaparecen totalmente el valor monetario de estos sitios, la competitividad local de la zona donde se ubican disminuye, así como la calidad de vida y se inhibe la actividad económica y el desarrollo sustentable.

No proteger el suelo también significa la desaparición de servicios ambientales, por ejemplo el de constituir el filtro para la recarga de acuíferos (se pone en riesgo el suministro de agua potable) o el permitir actividades recreativas (pérdida de valor social y cultural).

Entre las principales funciones del suelo se encuentran:

- a. Actuar como filtro regulador durante la recarga de acuíferos y protección de éstos.
- b. El lugar donde se llevan a cabo los ciclos biológicos, bio-geoquímicos y la red trófica.
- c. Un constituyente del hábitat biológico y de reserva para la preservación de especies, y por ende, de la diversidad genética.
- d. La base física para la producción de alimentos agrícolas y pecuarios.
- e. Un productor de recursos forestales.
- f. La base física para la construcción de edificaciones y servicios.

4.3.1. Propiedades fisicoquímicas del suelo.

Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50 por ciento del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman del 25 a 50 por ciento del volumen total. La proporción relativa de aire/agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3 y 6 por ciento del volumen

promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1 por ciento. Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular.

4.3.1.1. Textura. Define el área total de la superficie expuesta de las partículas del suelo. El área superficial es inversamente proporcional al tamaño de partícula, los suelos arcillosos tienen mayor área superficial que los suelos arenosos (Tabla 6).

La clasificación de los suelos es muy extensa dependiendo del autor, a continuación se muestra un listado breve en el cuál se describen algunas características:

- Arena: son partículas sueltas de granos simples.
- Limoso: Es muy suave al tacto, no se adhiere a los dedos.
- Arcillosa: Esta textura es plástica y adhesiva.
- Franco: Corresponde a la mejor textura, tiene proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla, que le da al suelo una excelente condición para el uso en plantas. Antes se le denominaba textura de migajón y se suponía que tenía un excelente nivel de fertilidad y condiciones adecuadas de drenaje.
- Franco limoso: más consistencia y es más suave entre los dedos.
- Franco arcillo arenoso y franco arcillo limoso: La diferencia entre las dos es que la primera es más áspera al tacto y adhiere moderadamente a los dedos, mientras que la segunda es suave y no se adhiere a los dedos.
- Franco arcilloso: Esta textura tiene bastante arcilla lo que la hace bastante coherente.

- Arcillo arenoso y arcillo limoso: La diferencia es que la primera es más áspera y se sienten los gránulos de arena, mientras que la segunda es más suave y se adhiere poco a los dedos.
- Arenoso franco: Es un suelo que tiene bastante arena pero tiene la suficiente cantidad de arcilla y limo para hacerlo ligeramente más coherente.
- Franco arenoso: La proporción de arcilla y limo aumenta lo que le da mucha más cohesión que la anterior.

Tabla 6. Diferentes clases texturales del suelo.

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Arena | Migajón arcillo arenosa |
| Arena migajosa | Migajón arcillosa |
| Migajón arenoso | Migajón arcillo limosa |
| Migajosa | Arcilla arenosa |
| Migajón limosa | Arcilla limosa |
| Limo | Arcilla |

Fuente: Casanova, M. (2006).

Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los limos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm), Tabla 7 Casanova, M. (2006). Es importante considerar esta propiedad, debido a que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Volke, 2002).

Tabla 7. Clasificación de partículas del suelo

| Fracción | Tamaño (mm) |
|------------------|--------------|
| Grava | > 2.0 |
| Arena muy gruesa | 2.0 – 1.0 |
| Arena gruesa | 1.0 – 0.5 |
| Arena media | 0.5 – 0.25 |
| Arena fina | 0.25 – 0.10 |
| Arena muy fina | 0.10 – 0.05 |
| Limos | 0.05 – 0.002 |
| Arcillas | < 0.002 |

Fuente: Casanova, M. (2006).

Se puede dividir en grupos más amplios como suelos de texturas livianas, medias y pesadas:

Livianas: Arenosa, areno franco, franco arenosa, franco arenosa fina.

Medias: Franco arenosa muy fina, franco, franco limoso, franco arcillo limoso.

Pesadas: Franco arcillosos, arcilloso arenoso, arcilloso limoso, arcilloso.

Fragmentos gruesos: Son los fragmentos mayores de 2 mm que constituyen la grava, casquijo y la piedra, los tamaños son los siguientes:

Gravas: 2,0 mm – 7,54 cm de diámetro

Casquijos: 7,5 cm – 25,0 cm de diámetro

Piedras y rocas: > 25,0 cm de diámetro

La proporción de las distintas partículas-arena, limo y arcilla se puede medir por medio de métodos de laboratorio y de campo.

A continuación se mencionan algunas:

- a) Tacto. Puede consistir en tomar una muestra de suelo, humedecerla hasta capacidad de campo y restregarla entre los dedos pulgar, índice mayor y sentir su suavidad, además que otras características se separan la muestra entre sí.
- b) Análisis de tamiz. Para la identificación de las partículas grandes del suelo, especialmente las comprendidas entre las gravas y la arena fina retenida en la malla número 200 (0.074 mm.) El porcentaje en peso que pasa esta malla se define como “finos”
- c) Ecuación de sedimentación (Método de la pipeta). Es la técnica más usada para separar el porcentaje de arcilla, limos y arenas de los “finos”. Depende de las

proporciones en que caen las partículas en un fluido viscoso y la medida de esa proporción, las cuales se definen por la siguiente ecuación:

$$\text{Ley de Stokes} \quad V = \frac{g}{18} \left(\frac{S_s - 1}{\mu} \right) d^2$$

Donde:

V = velocidad de sedimentación de la partícula (cm/s)

d = diámetro de la partícula (cm)

g = aceleración de la partícula $\cong 980 \text{ cm/s}^2$

S_s = densidad de la partícula $\cong 2.65 \text{ g/cm}^3$

μ = viscosidad absoluta del fluido (g/cm·s)

Agrupando términos, la ecuación puede expresarse como

$$V = K d^2$$

V [=] cm/min

d [=] mm

K, incluye todos los factores de la ecuación, es una constante.

De estimaciones o mediante gráfica, se encuentra que cuando la temperatura del agua se encuentra cercana a la temperatura normal del laboratorio se tiene que la constante toma el siguiente valor.

$$K = 6000$$

Cuando en un suelo se presentan aproximadamente proporciones iguales en peso de arena, limos y arcillas se habla de un suelo "franco" o migajón, en estas condiciones

predominan las propiedades de la arcilla, limos y arena (en ese orden), es decir, para el caso anterior se estaría hablando de un migajón arcilloso.

4.3.1.2. Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías *in situ* que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes (Volke, 2002).

4.3.1.3. Densidad real. Es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida. No obstante, considerando que la mayor parte de los componentes del suelo (aluminosilicatos, sílice) poseen una densidad oscilante entre 2,6 y 2,7 g/cm³, se toma un valor medio de 2,65 gr/cm³ (valor adoptado al realizar el análisis granulométrico).

4.3.1.4. Densidad aparente. Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo espacios vacíos. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Volke, 2002).

4.3.1.5. Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ*. En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

4.3.1.6. pH. Determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo. La solubilidad de muchos

contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

4.3.1.7. Humedad. Es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de remediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Volke, 2002).

4.3.1.8. Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías como la extracción de vapores y el lavado de suelos (Volke, 2002).

4.3.1.9. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). La existencia de superficies cargadas negativamente exige que haya iones de signo contrario, relacionados con tales superficies para que se cumpla el principio de electroneutralidad del sistema. Los cationes solvatados, al ser adsorbidos en la superficie forman complejos de superficie de esfera externa que resultan menos estables que los de esfera interna, debido a que no pueden establecer fácilmente enlaces iónicos o covalentes entre el grupo central y el ligando, por lo que son intercambiables (Hillel, 2004).

En un sistema de intercambio cabe distinguir:

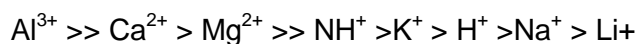
- Adsorbentes: Componentes del suelo que pueden acumular materia en su superficie.

- **Cambiadores:** Componentes del suelo en cuyas superficies pueden acumular iones de forma reversible, al tener reacciones que dan lugar a complejos de superficie de esfera externa.
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** Propiedad de un cambiador para adsorber cationes de la fase líquida (formación de complejos de superficie de esfera externa), readsorbiendo al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes, por destrucción de complejos de superficie. En el sistema se establece un equilibrio dinámico entre los cationes de la solución externa y los que ocupan sedes de cambio.
- **Sede de cambio.** Posición en la superficie de un cambiador en la que se establece la unión que da lugar al complejo de superficie de esfera externa.

La CIC de un suelo varía de horizonte a horizonte y en cada uno de ellos dependerá del contenido, tipo de minerales de arcilla y de componentes orgánicos.

La CIC se expresa en cmoles/kg o en meq/100 g.

Cationes intercambiables. Los más frecuentes son menos de diez, la presencia y predominio de unos u otros dependerán de las condiciones del medio y de las interacciones entre las interfases. La composición del complejo de intercambio se debe a la selectividad en la adsorción de los distintos cationes (series liotróficas). La secuencia de adsorción de los cationes puede ser:



El distinto comportamiento de los cationes en la doble capa se puede explicar atendiendo a su carga y al proceso de deshidratación de los iones en la superficie del cambiador.

El calcio y el magnesio por lo general se encuentran presentes en tres formas en el suelo: en solución, en sitios de intercambio y en forma de minerales. Solamente una pequeña fracción del total de Ca y Mg están presentes en solución, dependiendo del tipo de suelo.

La adsorción en algunos sitios en coloides minerales del suelo no son muy selectivos para los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , aunque el Ca^{2+} es ligeramente más preferido que el Mg^{2+} debido a su pequeño diámetro del ión Ca^{2+} hidratado, en comparación con el ión hidratado Mg^{2+} .

4.3.1.10. Interacciones complejas. Esto sucede entre las superficies de las arcillas, óxidos y materia orgánica controlan ampliamente las propiedades físicas de los suelos.

Los elementos químicos constituyentes del suelo pueden ocupar distintas posiciones:

- a) En la fase sólida. Se encuentran inmovilizados en una estructura mineral cristalina, en aluminio-silicato amorfo, y en compuestos orgánicos.
- b) En la interfase sólido-líquido. Se encuentran localizados en la superficie de determinadas partículas y en su área de influencia. Tienen lugar reacciones de superficie con uniones de distintos tipos entre el elemento y la superficie.
- c) En la fase líquida. El agua del suelo puede contener elementos en solución, así como partículas sólidas en suspensión (material coloidal soluble o pseudosoluble). Los iones disueltos precipitan al secarse el suelo y al añadir agua vuelven a disolverse. La reacción con un líquido se denomina solvatación y en el caso de un ión se conoce como hidratación.

La hidratación tiene efectos importantes sobre las reacciones de superficie y la movilidad del ión afectado (Tabla 8).

Tabla 8. En la fase líquida, el radio del ión hidratado es considerablemente mayor que el del ión deshidratado.

| Ión | Radio iónico (nm) | |
|------------------------------|-------------------|-----------|
| | Deshidratado | Hidratado |
| Li ⁺ | 0.078 | 1.003 |
| Na ⁺ | 0.098 | 0.793 |
| K ⁺ | 0.133 | 0.532 |
| NH ₄ ⁺ | 0.143 | 0.537 |
| Rb ⁺ | 0.149 | 0.509 |
| Cs ⁺ | 0.165 | 0.505 |
| Mg ²⁺ | 0.089 | 1.080 |
| Ca ²⁺ | 0.117 | 0.96 |
| Sr ²⁺ | 0.134 | 0.96 |
| Ba ²⁺ | 0.149 | 0.88 |

Hillel (2004).

4.3.1.11. Salinización

Es el resultado de la acumulación en el suelo de sales más solubles que el yeso (2,6 g/L en agua pura a 25°C). La salinización se refleja en un incremento en la conductividad eléctrica de la solución del suelo que tiene efectos adversos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y dificulta el crecimiento y la productividad vegetal. Los suelos afectados por este proceso se denominan suelos salinos y en ellos el Ca y el Mg son los cationes predominantes en el complejo de cambio. En el caso específico de que sea el Na el catión predominante en el complejo de cambio se habla de suelos sódicos, en los que esta acumulación de Na produce una alcalinización que da lugar a la dispersión de las arcillas y la materia orgánica y a la destrucción de la estructura del suelo. Los principales tipos de sales que se encuentran en suelos salinos son cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, y nitratos. Para que se produzca esta acumulación de sales en el suelo es necesario que haya un fuerte aporte de sales y que su eliminación del suelo esté impedida por algún mecanismo, como malas condiciones de drenaje y lavado. En regiones áridas y semiáridas, donde la evapotranspiración es superior a la precipitación, el proceso de salinización se origina de forma natural a partir de la herencia o alteración de la roca original (fundamentalmente rocas sedimentarias) o de las aguas de escorrentía cargadas de

sales que se acumulan por evaporación en las zonas más deprimidas. En otras ocasiones, las acumulaciones salinas ocurren por ascensión capilar de las sales en el suelo a partir de mantos freáticos suficientemente superficiales, especialmente en zonas costeras y, en cualquier caso, el viento siempre puede contribuir a la contaminación salina por arrastre de partículas en suspensión. Las actividades antropogénicas contribuyen en gran medida a la contaminación de los suelos por sales a través de prácticas agrícolas inadecuadas, como el riego con aguas salinas y el empleo de cantidades muy elevadas de fertilizantes solubles. La sobreexplotación de acuíferos ocasiona un descenso de los mantos freáticos regionales así como la intrusión de agua salina. Las actividades industriales, petroquímicas, mineras, entre otras contaminan directamente los suelos o indirectamente a partir de deposiciones atmosféricas o de las aguas superficiales.

4.3.1.12. Metales pesados. Son aquellos elementos metálicos que presentan una densidad superior a 5 g/cm^3 , aunque a efectos prácticos en estudios ambientales se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos o metaloides, de mayor o menor densidad, que aparecen comúnmente asociados a problemas de contaminación. Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades, como el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, V, Cu, Ni o Mo, y se vuelven nocivos cuando se presentan en concentraciones elevadas, mientras que otros no desempeñan ninguna función biológica y resultan altamente tóxicos, como el Cadmio, mercurio o el plomo.

4.3.2 Suelos contaminados con hidrocarburos.

Un suelo contaminado lo podemos definir como aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos o materiales extraños que por sus cantidades y características afectan la naturaleza del suelo (Tabla 9).

Por la gran importancia que representa el suelo para la vida del hombre y de todos los seres vivos, este recurso se debe conservar. Sin embargo, en la actualidad está seriamente amenazado por la práctica de sistemas de producción inadecuados o mal aplicados, que incluso han acelerado los procesos de erosión y desertificación de grandes zonas. De igual forma, la industrialización y urbanización han generado una gran cantidad de desechos que son incorporados al suelo, lo cual ocasiona tanto la reducción de su fertilidad como la modificación de sus procesos naturales. Por lo anterior, es necesario estudiar las características particulares del suelo para determinar su grado de contaminación y, consecuentemente, aplicar alguna de las tecnologías de remediación existentes.

Tabla 9. Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante.

| Producto Contaminante | Hidrocarburos | | | | |
|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|-------|
| | Fracción Pesada | Fracción Media | Fracción Ligera | BTEX | *HAPs |
| Mezclas | X | | | X | X |
| Petróleo crudo | X | | | X | X |
| Parafinas | X | | | | X |
| Aceites | X | | | | X |
| Gasolina | | | X | X | X |
| Diesel | | X | | | X |

*HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares)

Fuente: NOM-038-SEMARNAT/SS-2003

La degradación del suelo se puede definir como todo proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios. Aunque se puede producir por causas naturales, la degradación del

suelo es fundamentalmente la consecuencia directa de las actividades antropogénicas realizadas por el hombre.

El suelo representa un ecosistema donde, actualmente, se puede encontrar una gran variedad de compuestos tóxicos, entre los cuales se incluyen los hidrocarburos derivados de las actividades petroleras.

La contaminación de suelos y su remediación no es un problema que se pueda resolver desde una sola perspectiva, por eso es importante dar soluciones con diversas disciplinas afines, con criterios homogéneos.

Entendamos que si la contaminación del suelo y la degradación de sus funciones ya han ocurrido, debe realizarse, en lo posible, su remediación. Para elegir la tecnología adecuada es necesario considerar una serie de fenómenos fisicoquímicos y microbiológicos que ocurren en el suelo para poder dar un seguimiento al proceso de remediación.

Tabla 10. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.

| Fracción de hidrocarburos | Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca) | | |
|---------------------------|---|-------------|------------|
| | Agrícola | Residencial | Industrial |
| Ligera | 200 | 200 | 500 |
| Mediana | 1200 | 1200 | 5000 |
| Pesada | 3000 | 3000 | 6000 |

Fuente: NOM-038-SEMARNAT/SS-2003

Los productos asociados a los derrames de hidrocarburos para los que se establecen límites máximos permisibles de contaminación de suelos se enlistan en la (Tabla 10), NOM-038-SEMARNAT/SS-2003.

4.3.3 Mecanismos de transporte del contaminante en el suelo

El destino de los contaminantes tóxicos en el medio ambiente está determinado por variaciones químicas, físicas, biológicas y procesos ambientales que interactúan de una manera compleja.

Los cuatro principales medios por los que el transporte químico ocurre dentro del suelo son:

- a) Flujo descendente,
- b) Flujo ascendente,
- c) Difusión del líquido en el suelo y
- d) Difusión interfacial aire-suelo.

Los factores físicos, químicos, biológicos y ambientales que determinan el transporte de un contaminante en el suelo son:

- a) Solubilidad. Los componentes orgánicos difieren generalmente en la solubilidad, debido a sus características polares. Los surfactantes incrementan la solubilidad y degradación de los compuestos.
- b) Advección. Es el proceso por el cual el soluto es transportado por el movimiento másico del flujo de agua subterránea. En arenas y acuíferos gravosos, el factor dominante en la migración del disolvente contaminante es la advección.
- c) Dispersión y difusión. La velocidad de movimiento de los compuestos orgánicos causados por el aire, agua y materia orgánica es directamente proporcional a la concentración del tóxico y coeficiente de difusión. La difusión molecular del flujo de los solutos se realiza de una zona de alta concentración a una zona de baja concentración.

d) Adsorción. Es la asociación de materia, ya sean átomos, moléculas o iones a las superficies de los sólidos (interfase sólido-líquido). Hace que las concentraciones de las sustancias disueltas sean diferentes en las proximidades de las partículas en la fase líquida. En los mecanismos que dan lugar a la adsorción pueden hallarse implicadas fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno, enlaces covalentes y iónicos. La adsorción es quizá el factor más importante que afecta el comportamiento de compuestos orgánicos en el suelo. La adsorción de los constituyentes del suelo puede afectar la velocidad de volatilización, difusión o filtración, así como la disponibilidad de degradación química o microbiológica. Las principales superficies sólidas responsables para la adsorción de compuestos químicos son la materia orgánica sólida (cadenas de asociaciones con compuestos orgánicos hidrofóbicos), minerales arcillosos y minerales amorfos (hidróxidos ferrosos). Las interacciones distribuyen los contaminantes entre la fase acuosa y el acuífero sólido, disminuyendo la concentración en la fase acuosa, retardando el movimiento relativo de los contaminantes al flujo del agua subterránea. Para alcanzar el equilibrio en la adsorción puede requerir semanas o meses y además no siempre se alcanza en el campo. Los iones solvatados pueden estar influenciados por la existencia de superficies cargadas, sin llegar a formar complejos de superficie. En este caso los iones se mantienen difusos en la interfase y presentan una gran movilidad (iones en solvatación). La adsorción que afecta a especies no solvatadas es de tipo específico, mientras que si afecta a especies solvatadas es de tipo no específico. La adsorción se denomina específica debido a que depende significativamente de las configuraciones electrónicas particulares del grupo de superficie y del ión complejoado. En la formación de complejos de superficie cabe indicar que los enlaces electrostáticos con iones totalmente hidratados son los responsables

de la adsorción no específica con formación de complejos de superficie de esfera externa y de la existencia de un enjambre de iones en la interfase sólido-líquido que neutralizan las cargas de superficie, sin tener una localización fija en dicha interfase. Los cationes están sometidos, por un lado, a la atracción del campo eléctrico creado por la superficie cargada, y por otro, tienden a difundir desde la superficie hacia la solución al existir un gradiente de concentración. Esta situación puede representarse con una superficie de arcilla con carga negativa y iones a su alrededor cuya concentración disminuye con la distancia para los iones de signo contrario y aumenta con los del mismo signo. La superficie de la partícula cargada (carga negativa) y los iones de signo contrario (carga positiva) constituyen una doble capa eléctrica difusa. A una cierta distancia de la superficie se igualan las concentraciones de cationes y aniones, lo que permite establecer dos zonas, la doble capa difusa y la solución externa.

- e) pKa o constante de disociación. Indica el grado de acidez o basicidad de un compuesto, y además puede ser muy importante en determinar ambas propiedades para la adsorción o desorción. Los grupos funcionales pueden afectar el grado de adsorción de un compuesto químico. Las cadenas de las moléculas que terminan en $-OH$, $-CHOO$, y NH_2 forman complejos de arcillas, en tanto que, moléculas similares que terminan en $-Cl$, y $-Br$ no puede formar esos complejos. Todos los compuestos son adsorbidos fuertemente a un pH bajo; las sustancias aniónicas son adsorbidas negativamente con condiciones básicas ligeras. y los compuestos no iónicos son moderadamente adsorbidos. Los procesos de adsorción son exotérmicos y los de desorción son procesos endotérmicos, un incremento en la temperatura podría reducir la adsorción y favorecer el proceso de desorción.
- f) Volatibilidad. Depende de las fracciones que componen al diesel.

4.3.4 Remediación de suelos contaminados

Remediación. Es la acción de remediar o estar trabajando en el sitio, incluyendo la excavación en los fangos o barros y suelos subyacentes.

La remediación de suelos puede dividirse en dos grandes grupos:

- a) *Ex situ*: Cuando se excava el suelo y se lava fuera del sitio donde se contaminó.
- b) *In situ*: El término *in situ* proviene del latín y significa “en su ubicación original”. El tratamiento se lleva a cabo por debajo de la superficie. Cuando no se requiere escarbar. Consiste en la inyección de soluciones lavadoras (surfactantes) al subsuelo, bajo condiciones controladas con el fin de remover los contaminantes adsorbidos a la matriz del suelo.

4.3.5 Biorremediación

Se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, entre otros.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía.

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de adsorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales.

4.4 Lavado de suelos *in situ*.

Es un tratamiento que puede ser *in situ* el cual consiste en anegar los suelos contaminados con una solución que transporte los contaminantes a una zona determinada y localizada donde puedan ser eliminados. Así, los contaminantes son extraídos del suelo haciéndole pasar agua u otras soluciones (surfactantes) mediante un sistema de inyección o infiltración. El agua subterránea y los fluidos contaminados se capturan y bombean a la superficie utilizando pozos de extracción, donde son tratados y, en ocasiones, reciclados. El lavado se aplica a todo tipo de contaminantes, especialmente a compuestos inorgánicos incluidos los elementos radioactivos, y se suele combinar con otros tratamientos como la biodegradación y el tratamiento con bombeos (pump&treat). Así mismo, es difícil de aplicar en suelos de baja permeabilidad o ricos en elementos finos.

Los HTP's pueden ser recuperados vía extracción o bien en zanjas, sin embargo una porción puede ser atrapada en las estructuras de los poros de las fronteras de los acuíferos. La recuperación de los HTP's requiere su movilización la cual puede ser acompañada por varios medios como la de lavados *in situ*.

Las principales limitaciones de la remediación en el bombeo y tratamiento son la incapacidad por la movilización de muchos solventes orgánicos hidrofóbicos. Los surfactantes pueden direccionar este problema mejorando la remediación incrementando la movilidad de los contaminantes por combinaciones.

La remediación convencional bombeo-depuración es limitada por la transferencia de masa (desorción de los contaminantes hidrofóbicos). Una remediación común en la superficie es la extracción de los contaminantes (bombeo) en el terreno, procesando los residuos y gestionando los desechos. Los compuestos hidrofóbicos son desorbidos por las micelas de los surfactantes que pueden incrementar significativamente la masa

de los contaminantes extraídos por volumen de agua bombeada, de ese modo se supera las limitaciones de la transferencia de masa. Cuando se añade más surfactante las concentraciones exceden la CMC, el número de micelas incrementa, de ese modo mejora la solubilidad del contaminante. Estos procesos (solubilización) mejoran la desorción de contaminantes altamente hidrofóbicos y la disolución de residuos saturados. La movilización (microemulsificación) tiene un efecto dramático en el mejoramiento en la extracción de residuos saturados, en la tensión interfacial que disminuye insignificadamente, mejorando el incremento en la solubilidad.

Una alternativa en la extracción de contaminantes de la superficie es la remediación *in situ* de la pluma del contaminante, debido a que puede aportar reducciones significantes en la velocidad de migración del contaminante. Algunas limitaciones como la cantidad del contaminante incluyen las condiciones geológicas como las del flujo de agua subterránea de la zona.

La presencia de alguna de estas características resulta baja y posibilita la remediación incompleta de la zona cuando se emplea un sistema bombeo-tratamiento. La presencia de surfactantes en el sistema puede acelerar la remediación en zonas de permeabilidad bajas algunas en toda su extensión reduciendo la tensión interfacial permitiendo penetrar en estas zonas repletas de agua subterránea.

Los límites en la solubilización del surfactante pueden verse como una función de la solubilidad acuosa de los compuestos (por ejemplo una alta solubilidad acuosa, un incremento bajo en la solubilización que se pueda alcanzar). Por ejemplo, la solubilidad de 1,2-dicloroetano con una solubilidad acuosa de 8690 ppm incrementa por solo un factor de tres en una solución de surfactante; mientras que, la solubilidad de PCE a 150 ppm incremento por un factor de 135 en una solución de surfactante en al uno por ciento. Mientras este efecto limita el incremento en la eficiencia que puede

ser obtenida directamente por la solubilización de compuestos orgánicos más solubles, otro efecto como el mejorar la desorción de contaminantes mezclados produce incrementos significativos en la eficiencia de extracción. Cabe mencionar que se han desarrollado más lavados de suelos contaminados *ex situ* que para el caso de lavados *in situ*.

OBJETIVOS

CAPÍTULO 5

5.1 Objetivo general

Demostrar la factibilidad del lavado *in situ* de un suelo contaminado con diesel, asistido con surfactantes.

5.2 Objetivos específicos

1. Caracterización de un suelo contaminado con diesel en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas y concentración de contaminantes.
2. Definir el mejor surfactante y dosis para el lavado de tal suelo.
3. Diseñar y montar una columna con una capacidad de 600 g, para lavar el suelo contaminado con diesel.
4. Evaluar diversos parámetros (tipo y concentración de surfactante empleado, el flujo de alimentación sobre la eficiencia de remoción del sistema) y el efecto de estos sobre el nivel de contaminación inicial del diesel (HTP's).

Materiales

y

Métodos

CAPÍTULO 6

6.1 Muestreo del suelo.

El suelo se colectó del oriente de la ciudad de México, según la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

El suelo se colectó a una profundidad de 50 cm, el cual se depositó en bolsas de plástico, se etiquetó y se trasladó al laboratorio para realizar su caracterización fisicoquímica.

6.2 Caracterización fisicoquímica del suelo.

Se realizó en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000. Todas las pruebas se realizaron por duplicado.

6.2.1 Textura.

Determinación de la textura en laboratorio.

Se pesaron dos muestras, la primera de 110 y la segunda de 55 g de suelo húmedo respectivamente, ambas se hicieron pasar por la malla 10 (2 mm), Figura 3. La muestra dos se secó en la estufa por 24 h a 100°C.



Figura 3. Mallas de acero inoxidable, utilizadas en diferentes pruebas realizadas.

La muestra uno se dispersó y se colocó en una probeta de sedimentación para ser diluida posteriormente en una probeta de 1000mL (Figura 4). La temperatura de laboratorio fue de 23 °C.



Figura 4. Método de la probeta para determinar la textura del suelo.

Muestra dos:

Peso de la charola sin muestra (P1) = 2.2086 g

Peso de la charola con muestra (P2) = 55.0857 g

Peso de la charola con muestra seca (P3) = 54.9361 g

Los tamaños críticos que se establecen son los límites entre la arena y los limos (0.05 mm), entre los limos y las arcillas (0.002 mm).

De acuerdo con la ley de Stokes para las partículas de 0.05 mm se tiene una velocidad de:

$$V = K d^2 = 6000 (0.05)^2 = 15 \text{ cm/min.}$$

Se invirtió la probeta varias veces, se agitó y se colocó sobre la mesa, 60 s después se extrajo una muestra de 25 mL a una profundidad de 15 cm.

Muestra:

Peso de la charola sin muestra (P1) = 1.3362 g

Peso de la charola con muestra (P2) = 26.9000 g

Peso de la charola con muestra seca (P3) = 1.9482 g

La velocidad de sedimentación de las partículas de 0.002 mm es:

$$V = 6000 (0.002)^2 = 0.024 \text{ cm/min.} = 1.44 \text{ cm/h}$$

Estas partículas se sedimentan 3 cm en 2h 5 min. Transcurrido este tiempo se tomó una muestra de 25 mL a una profundidad de 3 cm, se colocó en la capsula 3 para su secado.

Muestra:

Peso de la charola sin muestra (P1) = 1.3301 g

Peso de la charola con muestra (P2) = 26.0535 g

Peso de la charola con muestra seca (P3) = 1.3360 g

Se obtienen el peso de limos + arcillas, arcillas, limos y arenas solas con lo que se obtiene el tipo de suelo.

Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas, considerando tres componentes principales: arenoso, limoso o arcilloso. En general, la clasificación está basada en el análisis granulométrico según la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000.

Con los porcentajes obtenidos, entramos al diagrama de clasificación de suelos por texturas del Departamento de Agricultura (USA), y encontramos la clasificación del suelo a la que pertenece nuestra muestra.

Cálculos:

110.1400 g (55.0857 g - 54.9361 g) = 109.8408 g de suelo seco en la probeta

El peso de la muestra para partículas de 0.05 y 0.02 mm fue de 0.612 y 0.0259 g respectivamente.

Peso de limos + arcillas = 0.612 g (1000 mL/25 mL) = 24.48 g

%de limos + arcillas = (24.48 g/109.8408 g) * 100 = 22.28 por ciento

Peso de la arcillas = 0.0259 g (1000 mL/25 mL) = 1.036 g

%de arcillas = (1.036 g/109.8408 g) * 100 = 0.94 por ciento

%de arenas = 100 – 22.28 %= 77.72 por ciento

%de limos = 22.28 – 0.94 %= 21.34 por ciento

6.2.2 Densidad real (dr).

Materiales: probeta de 100 mL, mallas de acero inoxidable, piseta con agua.

Reactivos: suelo sin contaminar.

Desarrollo: Se pesó una probeta limpia y seca de 100 mL (P1), luego se le agregó 10 g de suelo tamizado (malla 10), (P2). Posteriormente se le agregó agua hasta la marca de los 100 mL y se procedió a pesar (P3). Posteriormente se pesó la probeta con 100 mL de agua (P4).

$$dr = (\text{masa del sólido} / \text{volumen del sólido}) * \text{densidad del agua}$$

$$\text{Masa sólido} = P2 - P1$$

$$\text{Volumen sólido} = V \text{ total} - V \text{ no ocupado por el sólido}$$

$$Vt = P4 - P1$$

$$V_n = P_3 - P_2$$

$$V_s = V_t - V_n$$

$$d_r = (P_2 - P_1)/(p_2 - p_1) - (p_3 - p_4) * \text{densidad del agua}$$

6.2.3 Densidad aparente (d_a).

Materiales: probeta de 100 mL, mallas de acero inoxidable, piseta con agua.

Reactivos: suelo sin contaminar.

Desarrollo: Se pesó la probeta limpia y seca de 100 mL (p_1), posteriormente se llena la probeta hasta la marca de 100 mL con suelo tamizado (malla 10) previamente, se dan tres golpes sobre la mesa y se procede a pesar nuevamente (p_2). Se agregó agua y se pesó de nuevo (p_3).

$$d_a = (p_2 - p_1) / (p_3 - p_1) * \text{densidad del agua}$$

6.2.4 Porosidad.

Indica el número de poros en el suelo y determina la capacidad de permeabilidad.

$$\% \text{ Porosidad} = (\text{volumen de poros/volumen total}) * 100$$

$$\% P = (1 - d_a/d_r) * 100$$

6.2.5 pH.

Materiales: vaso de precipitado de 25 mL, probeta de 100 mL, piseta con agua, potenciómetro.

Reactivos: soluciones amortiguadoras pH 4 y 7, suelo sin contaminar.

Desarrollo: Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un vaso de precipitado de 25 mL, se agregó 10 mL de agua destilada y se agitó durante un minuto, transcurrido el tiempo se dejó sedimentar por 10 min.

Se ajusta el potenciómetro con soluciones amortiguadoras pH 4 y 7, transcurridos los 10 minutos se procede a realizar las lecturas.

6.2.6 Humedad.

Materiales: charolas de aluminio, estufa, pinzas, espátulas, desecador.

Reactivos: suelo sin contaminar.

Desarrollo: Se pesó 1 g de muestra sobre una charola a peso constante, posteriormente se colocó la muestra dentro de la estufa a 100°C por 24 h, transcurrido el tiempo se sacó la muestra y se colocó en un desecador hasta que se obtuvo un peso constante. Se pesó la muestra con todo y charola.

$$\% H = (P1 - P2) / P2 * 100$$

6.2.7 Materia Orgánica

Es un procedimiento indirecto por el cual se determina el carbono de la materia orgánica, por ser un elemento constante en ella.

Materiales: Matracas Erlenmeyer de 250 mL, buretas de 25 y 50 mL, probeta de 100 mL, vasos de precipitado de 50 mL, soporte universal, pinzas para bureta, campana de extracción, piseta con agua destilada y balanza analítica.

Reactivos: dicromato de potasio (1 N), sulfato de hierro (0.5 N), ácido sulfúrico concentrado, ácido fosfórico al 85%, difenilamina (indicador).

Desarrollo: Se pesó por triplicado 1 g de suelo previamente tamizado por la malla 100, se depositó en un matraz Erlenmeyer y se realizó lo mismo para un blanco pero sin suelo. Se agregó a la bureta 2 mL de dicromato de potasio 1N agitando suavemente, bajo la campana de extracción se agregaron 20 mL de ácido sulfúrico concentrado se agitó por un minuto y se dejó reposar por 10 min. Transcurrido este tiempo se agregaron 100 mL de agua destilada a cada matraz y 10 mL de ácido fosfórico. Se añadieron tres gotas del indicador difenilamina antes de iniciar la titulación. Previamente se llenó una de las buretas hasta el aforo con sulfato ferroso al 0.5 N. Una vez realizado esto se inicia la titulación con el blanco agitando el matraz para observar el cambio de color de la solución.

Al momento de vire a color verde esmeralda brillante se registró el volumen en mililitros de sulfato ferroso gastados en cada una de las diferentes muestras (Tabla 11).

Tabla 11. Calculos para obtener el porcentaje de materia orgánica.

| Muestra | mL de sulfato ferroso gastados |
|----------|--------------------------------|
| Blanco | 8.1 |
| Promedio | 5.26 |

$$MO = (\text{mL dicromato de potasio}) * (1 - (s/b)) * K$$

$$K = 1.34$$

$$S = \text{mL de sulfato ferroso gastados}$$

$$b = \text{mL de sulfato ferroso gastados en el blanco}$$

6.3 Contaminación del suelo.

El suelo se contaminó artificialmente con Diesel a una concentración de 30,000mg/kg de suelo seco, en base a la NOM-038-SEMARNAT-2004 para

fracciones medias. Se homogenizó cada dos días durante sesenta días (Figura 5).

La muestra total fue al 3 por ciento (9 kg de suelo con 270 g de Diesel).



Figura 5. Contaminación artificial del suelo con diesel.

6.4 Lavado del suelo sin contaminar y contaminado.

El suelo sin contaminar y contaminado el cual se homogenizó durante 90 días se lavó con el equipo de reflujo Soxhlet para obtener la concentración real de HTP's antes y después del proceso de contaminación (Linares, 2006).

El lavado del suelo contaminado con Diesel se realizó con el equipo de reflujo Soxhlet, el cual se describe a continuación.

Material: Perlas de ebullición, Cartuchos de celulosa, Balanza analítica, Vaso de precipitados de 250 ml, Viales, Espátula, Refrigerantes, Matraces bola de 250 mL, Columna extractora del equipo Soxhlet, Rotoevaporador.

Reactivos: Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4 7 H_2O), Hexano.

Desarrollo:

- a. Colocar de 5 a 10 g de suelo seco y finamente molido en un cartucho de celulosa.
- b. Adicionar sulfato de sodio anhidro en una relación suelo:sulfato 1:1 y mezclar.
- c. Colocar cada cartucho conteniendo las muestras dentro de la camisa o columna extractora del equipo Soxhlet.
- d. Adicionar 125 ± 5 ml de hexano en el matraz bola y colocar suficientes perlas de ebullición para evitar la proyección del solvente al calentarse.
- e. Ensamblar el equipo Soxhlet e iniciar calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 45°C .
- f. Mantener el reflujo en estas condiciones de tal manera que se efectúen 80 reflujos totales, lo que permitirá la liberación de los analitos (Linares, 2006).
- g. Después de los 80 reflujos totales, el extracto orgánico contendrá todos los hidrocarburos solubles en hexano. Pasar el matraz bola a un roto-evaporador y concentrar el extracto orgánico a sequedad.
- h. Recuperar el concentrado y por diferencia de pesos se tiene la cantidad de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) desorbidos.

6.5 Tiempo de lavado

Con un cronómetro se mide el tiempo que tarda en realizarse el primer reflujo una vez estabilizado el sistema, después se multiplica por el factor de 80 que son la cantidad de reflujos mínimos requeridos para el lavado de suelos. Con esto obtenemos el tiempo real que se requiere para 80 reflujos, esto se realiza para cada muestra a analizar (Linares, 2006).

Ejemplo: para 5 min con 15 s, esto es igual a $5.25 \text{ min} * 80 \text{ reflujos} = 420 \text{ min} = 7 \text{ h}$ totales de lavado para una muestra.

6.6 Elección del mejor surfactante para la remoción de diesel.

Se prepararon 13 surfactantes sintéticos (0.5% v/v) y 3 biosurfactantes (0.1% v/v), el total de cada solución preparada para efectos de este primer lavado fue de 20 mL.

El lavado se realizó en viales de vidrio con un volumen de 40 mL, se pesaron 6 g de suelo contaminado y se mezclaron con 20 mL de surfactante o biosurfactante (Tabla 12).

Tabla 12. Tensoactivos utilizados en el lavado en viales.

| Surfactante | Biosurfactante |
|---------------|------------------|
| Polafix LO | Algarrobo |
| Surfacpol A | Goma guar |
| Maranil IAB | Goma de mezquite |
| Triton X-100 | |
| BT 35 | |
| Texapon N-40 | |
| Dehyton KB | |
| Emulgin W | |
| Surfacpol G | |
| Dehyquarta | |
| Tween 80 | |
| Sulfopón 30 | |
| Emulgin W-600 | |

El proceso de desorción se realizó durante 23 h a 120 rpm y 25°C en un agitador INO-650 M (Figura 6).



Figura 6. Lavado de suelos en viales en agitador INO-650 M.

Transcurridas las 23 h, se dejó sedimentar por 1 h para separar la fase sólida de la líquida y se recuperó el suelo lavado. Se dejó secar en charolas de aluminio a temperatura ambiente hasta sequedad total (Figura 7).



Figura 7. Suelo lavado y llevado hasta sequedad total.

La cuantificación de HTP's se realizó con el equipo de reflujo método Soxhlet descrito anteriormente, el cual proporciona una medida directa de los hidrocarburos totales removidos por lavados continuos con hexano utilizado como solvente (Figura 8).



Figura 8. Equipo de reflujo Soxhlet.

6.7 Determinación de metales.

Se realizó en el suelo sin contaminar mediante el método espectrofotométrico de absorción atómica, según la NMX-AA-51-81.

6.8 Cuantificación de Hidrocarburos.

Se realizó mediante el método analítico EPA 8015B-1996/ANEXO A2 NOM-138-SEMANART/SS-2003. El Benzeno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX) se analizaron mediante el método analítico EPA8260B-1996/ANEXO A4 NOM-138-SEMANART/SS-2003 y los Hidrocarburos Poli aromáticos (HAP's) mediante el método analítico A.5. NOM-138-SEMANART/SS-2003 / EPA 8270D.

6.9 Diseño de la columna.

Se diseñaron dos columnas de acrílico de 20.5 cm de alto, por 6.8 cm de diámetro exterior y 5.2 cm de diámetro interior, con un volumen total de 725 cm³ (Figura 9). Las columnas contienen tres orificios los cuales sirven de entrada de alimentación de la

solución lavadora y de salida de la misma, la cual debe de desorber el contaminante del suelo (diesel).



Figura 9. Columna de acrílico, diseñada para realizar lavados *in situ*.

6.10 Lavado en columnas

Una vez obtenido el mejor surfactante en los resultados que arrojaron el lavado en viales, se procedió a lavar el suelo contaminado en las columnas de acrílico con una capacidad de diseño de 600 g. Los lavados se realizaron por duplicado.

Las columnas fueron empacadas (3 cm) con una capa de tezontle previamente triturado y tamizado por malla del número 10, posteriormente se adicionaron 450 g de suelo contaminado compactándolo cada 5 cm con una pesa de 250 g con dos golpes por cada cama de suelo (Figura 10).



Figura 10. Columnas empacadas con suelo contaminado

Las variables que se modificaron durante la fase experimental fueron:

Velocidad de alimentación 5 y 10 mL/min respectivamente,

Tiempo de lavado (24, 48, 72, 96 y 120 h),

Concentración del surfactante (0.05, 0.1, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 %v/v),

Solución lavadora (agua:surfactante, agua:biosurfactante, agua:cloruro de sodio:surfactante y agua sola).

La alimentación de la solución lavadora se realizó con una bomba peristáltica, la cual se unió a dos mangueras de alimentación que previamente se conectaron a dos válvulas reguladoras de flujo que alimentaban cada una a una columna.

RESULTADOS

y

DISCUSIONES

CAPÍTULO 7

7.1. Propiedades fisicoquímicas. La estructura y composición del suelo dependen de muchas variables las cuales van a limitar el lavado de contaminantes, dentro de los cuales podemos mencionar a la densidad aparente y real los cuales influyen directamente en el número de poros. El contaminante puede adsorberse y desorberse en medida directa de la porosidad del sistema, es decir entre más espacio poroso exista (suelos arenosos) permanece un mayor desplazamiento hacia el fondo del contaminante o la sustancias que sean utilizadas. Por otra parte si los suelos son elevadamente arcillosos disminuye el número de poros, es decir el espacio entre partícula y partícula es muy pequeño lo cual afecta en el drenaje de los suelos. Ambos casos son los extremos de la clasificación de suelos y esto llega a limitar o beneficiar el lavado de suelos.

La densidad real del suelo indica la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida. La densidad aparente (peso seco del suelo /volumen) de un suelo se suele utilizar como medida de la estructura del suelo. Una densidad baja generalmente equivale a más porosidad y mayores agregados del suelo, las cuales dependen de la cantidad de minerales, materia orgánica, compactación del suelo, las actividades de animales que excavan en la tierra, la abundancia de raíces de planta, entre otros.

Los datos obtenidos en el laboratorio indican una densidad aparente de 0.9107 g/mL y una densidad real de 1.86 g/mL, para obtener una relación en la porosidad del 51 por ciento. Estos resultados indican que existe una buena porosidad en la matriz de estudio lo cual puede ser benéfico al sistema de lavado. La humedad del suelo fue baja 2.28 por ciento la cual depende del tipo y concentración de nutrientes disponibles, así como de la capacidad y composición del suelo mismo.

El porcentaje de materia orgánica fue del 0.94, lo cual no es un referente de la actividad microbiana, ni del número de microorganismos o biomasa presente en el sistema, de manera que no influye directamente en el tratamiento fisicoquímico que se plantea desarrollar. La materia orgánica al ser escasa favorece la adsorción del diesel a la matriz del suelo y no del microorganismo, lo cual aumenta la relación de desorción contaminante-suelo.

Las soluciones acuosas de los surfactantes son afectadas por condiciones ambientales como el pH. La formación de micelas a partir de surfactantes aumenta por condiciones elevadas de pH. A pH elevados, disminuye la tensión superficial de las soluciones de surfactantes. El pH del suelo sin contaminar fue de 8.51 lo cual indica que es muy básico según lo reportado en la literatura, esto puede favorecer la formación de micelas para que se desorba la mayor cantidad de HTP's presentes en la matriz. Este pH se debe principalmente al tipo de materiales por el que está conformado el suelo, dentro de lo cual podemos descartar que se deba a la cantidad de materia orgánica presente, debido a que ésta es muy baja siendo alrededor del 0.94 por ciento (Tabla 13).

Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas del suelo utilizado en este estudio.

| Humedad % | pH | Materia orgánica % | Densidad aparente g/mL | Densidad real g/mL | Porosidad % |
|--------------|------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------|
| 2.2773 | 8.51 | 0.94 | 0.9107 | 1.8600 | 51 |

El tipo de suelo que corresponde a la fracción de limos, arcillas y arenas presenta un porcentaje de arena, limos y arcillas correspondientes al 77.22, 21.34 y 0.94 respectivamente (Tabla 14).

Tabla 14. Textura del suelo sin contaminar

| Suelo | Porcentaje en peso |
|----------|--------------------|
| Arena | 77.22 |
| Limos | 21.34 |
| Arcillas | 0.94 |

El suelo que se obtuvo según los datos que corresponden a la tabla 14 se interpolaron en el diagrama de clasificación de suelos por textura fue un ARENOSO FRANCO (Figura 11).

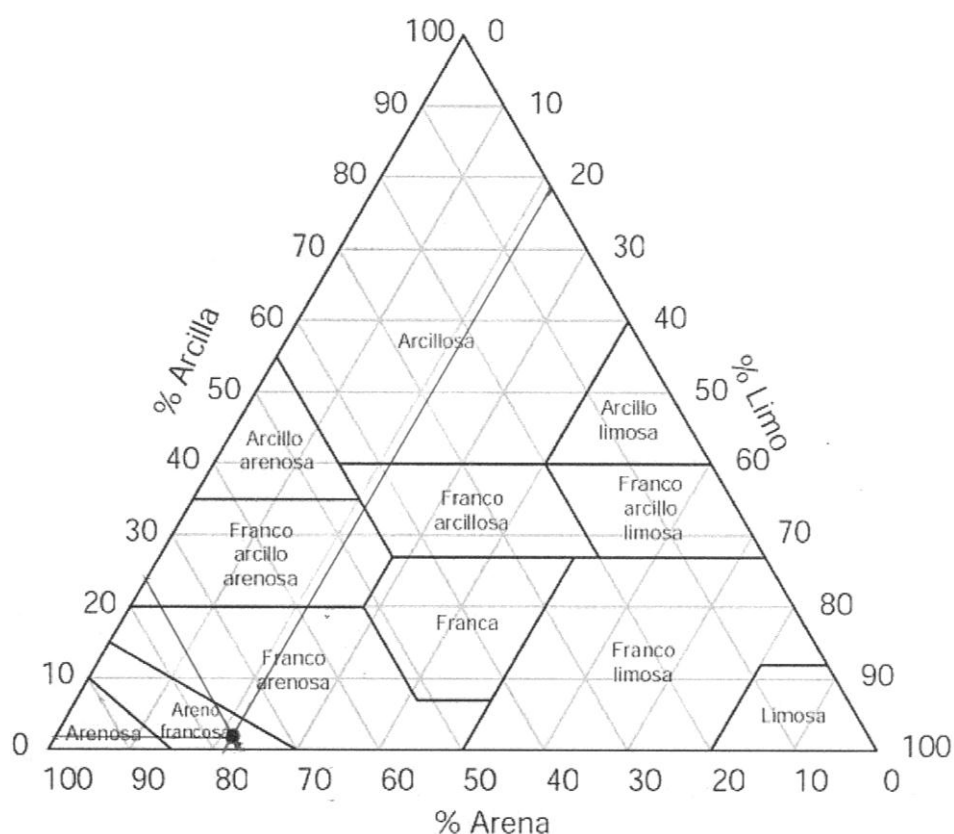


Figura 11. Triángulo de texturas

Los suelos Arenoso franco tienen bastante arena pero tienen la suficiente cantidad de arcilla y limo para hacerlo ligeramente más coherente.

Los elementos monovalentes como el Na^+ y el K^+ presentes en el suelo sin contaminar son menores en cuantía, esto representa una suma de 2,957.56 mg/kg. Para el caso de los elementos divalentes como el Cd^{2+} , Ca^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , representan una cantidad total de 31989.201 mg/kg (Tabla 15). Es importante

observar que la relacion de metales alcalinoterreos Na + K entre los alcalino terreos divalentes Ca+Mg es equivalente a 0.1236, lo que indica un exceso de metales divalentes.

Tabla 15. Metales presentes en una muestra de suelo sin contaminar.

| Metal | Resultados (mg/Kg) |
|------------|--------------------|
| Cd | 0.015 |
| Ca | 12,076.51 |
| Cu | 14.06 |
| Cr | < 0.06 |
| Fe | 7,984.98 |
| Na | 621.82 |
| K | 2,335.74 |
| Mg | 11,864.56 |
| Ni | 0.231 |
| Pb | 24.92 |
| Zn | 23.73 |
| Na+K/Ca+Mg | 0.1236 |

7.2. Hidrocarburos presentes en el suelo.

La cantidad de HTP's presentes en el suelo sin contaminar fue de 80.12 mg HTP's/kg suelo seco debido a la materia orgánica presente, el cual es un valor indirecto representativo. El suelo una vez contaminado con diesel a una concentración del tres por ciento (30,000 mg HTP's/ Kg suelo seco) fue homogeneizado por dos meses cada dos días, se analizó por el método de reflujo Soxhlet.

La cuantificación de HTP's adsorbidos a la matriz del suelo caso de estudio fue de 24,762 mg HTP's/kg suelo seco (Tabla 16).

Tabla 16. Hidrocarburos Totales del petróleo presentes en el suelo.

| Suelo | mg HTP's/ Kg suelo seco |
|--|-------------------------|
| Sin Contaminar | 80.12 |
| Contaminado con Diesel después de tres meses | 24,762 |

La pérdida de HTP's durante los dos meses que se homogenizó, puede ser debido a procesos de evaporación de las fracciones ligeras de HTP's o a una biorremediación que fue inducida indirectamente por la cantidad de microorganismos que pudieron estar presentes en el suelo.

Las fracciones presentes de un contaminante determinado indican que tipo de compuestos existen, lo cual proporciona información valiosa para determinar que tipo de remediación vamos a utilizar. Determina si el proceso es biológico o fisicoquímico.

De los análisis realizados a una muestra de suelo contaminado con diesel se obtuvo que no se detectaron concentraciones de Hidrocarburos Poliaromáticos (HAPs) ni de Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno (BTEX).

Las fracciones presentes de los Hidrocarburos de Fracción Media (HFM) fue de 16,258.7 mg/kg en base seca, este análisis se realizó después de 8 meses de contaminado el suelo (Figura 12). El cromatograma no muestra el porcentaje de cada fracción analizada, indica la cantidad de hidrocarburos en mg/kg en base seca. Los porcentajes para las distintas fracciones de hidrocarburos presentes fueron >C10<C15 (25.96%), >C15<C20 (51.51%), >C20<C25 (19.27%), >C25<C28 (3.26%). Lo cual equivale en mg/kg 4220.76, 8374.86, 3133.05, 530.03 respectivamente.

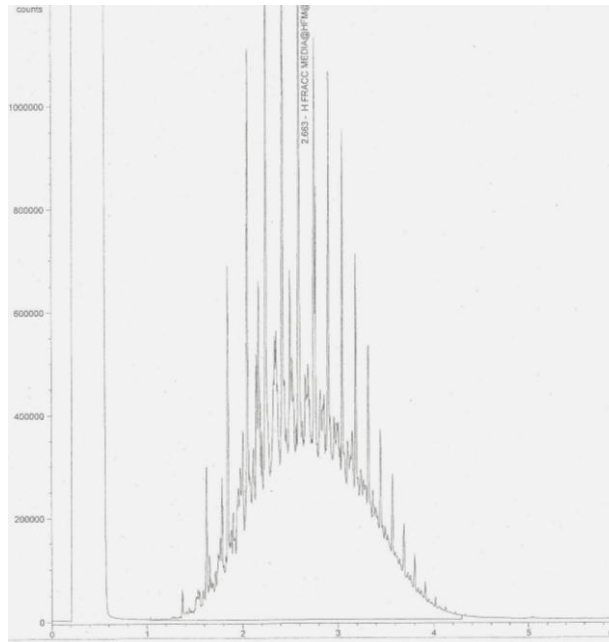


Figura 12. Cromatograma general para los HFM en un suelo contamiando con diesel.
Tiempo de retención contra abundancia.

7.3. Lavado de suelos en viales para elegir el mejor surfactante.

El lavado del suelo en viales se realizó con 13 diferentes surfactantes sintéticos a una concentración del 0.5 y tres biosurfactantes (algarrobo, goma guar y mezquite) al 0.1 por ciento v/v respectivamente (Figura 13).

La concentración inicial de HTP's fue de 24,762 mg/kg de suelo seco. El tensoactivo que obtuvo una mayor remoción fue el Texapon N-40 (Lauril sulfato éter de sodio) que es un surfactante aniónico (Tabla 17), el cual presentó una desorción de diesel de aproximadamente del 50 por ciento (12166 mg/kg de suelo seco).

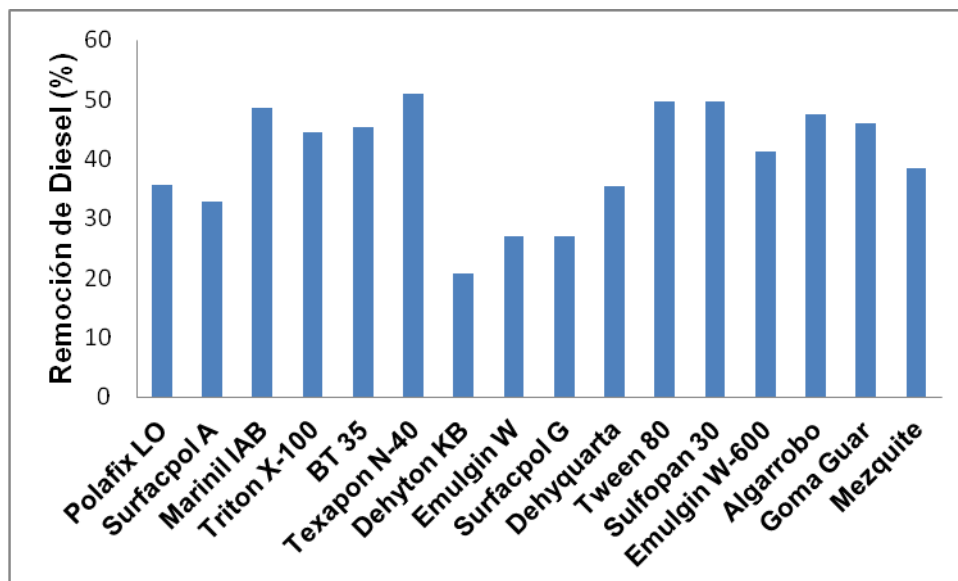



Figura 13. Tensoactivos contra remoción de diesel (%).

El Texapon N-40 solubilizó la fracción media de los hidrocarburos presentes en el diesel que fueron adsorbidos por el suelo. Siendo la desorción de 12,596.12 mg/kg de suelo seco (51 por ciento), esto es debido a que se redujo la tensión interfacial de los compuestos aumentando la CMC logrando que las micelas desorbieran los HTP's. Se observó que a concentraciones bajas del surfactante se logran mayores tasas de remoción. Se obtuvieron remociones similares para el Marinil que fue del 48.64 por ciento y para el Sulfopón 30 fue de 49.6 por ciento, ambos son surfactante aniónicos, lo cual representa una cantidad equivalente de 12,044.20 y 12,282.21 mg/kg de suelo seco respectivamente.

La característica de estos tres surfactantes sintéticos es que contienen una molécula de sulfato de sodio en su estructura lo cual indica que la desorción se ve favorecida por el grupo sulfato. Esta cabeza polar solubilizó los hidrocarburos de fracción media formando agregados entre la solución y el contaminante, logrando que la parte del grupo alquilo se desorbiera aumentando la eficacia del sistema.

Tabla 17. Surfactante elegido para el lavado de suelos contaminados con Diesel.

| | |
|---------------------|---|
| Nombre IUPAC | 2(2-dodecil-oxi-etoxi) etil-sulfato de sodio |
| Nombre Trivial | Lauril sulfato de sodio |
| Nombre Comercial | Texapon N40 |
| Tipo de Surfactante | Aniónico |
| PM (g/mol) | 332.43 |
| Formula Química | $C_{14}H_{29}NaO_5S$ |
| |  |

7.4. Elección del mejor tensoactivo

El lavado se realizó en viales según lo descrito anteriormente se pesaron 6 g de suelo contaminado con 20 mL de solución durante 23 h a 120 rpm y 25°C en un agitador INO-650 M. Las concentraciones de la solución de Texapon N-40 en agua fueron 0.1, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.0 por ciento respectivamente (Figura 14).

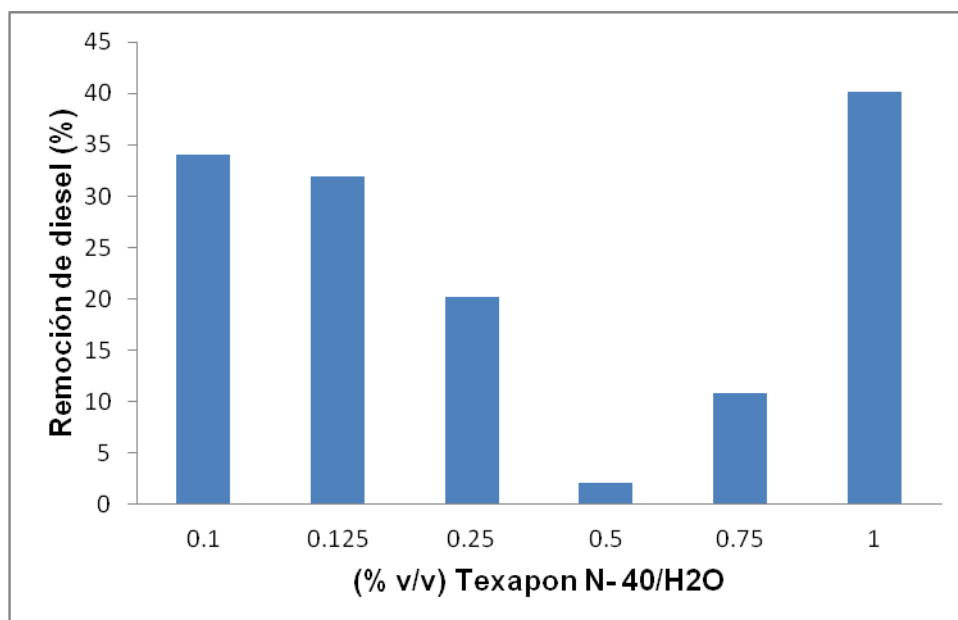


Figura 14. Lavado de suelos a diferentes concentraciones de disolución (Texapon N-40/H₂O)

El lavado del suelo contaminado con diesel a diferentes concentraciones sigue una tendencia de campana inversa debido a las propiedades termodinámicas del proceso en sí. Cada surfactante muestra una curva específica que pueden ser en forma de campana, campana inversa, líneal exponencial o líneal decreciente, según el caso de estudio (contaminante, tipo de suelo y solución lavadora).

Las mayores remociones que se observaron son del 34 y 40 por ciento para el lavado con Texapon N-40 a concentraciones del 0.1 y 1.0 por ciento respectivamente. Esto equivale a 8845 y 9936 mg/kg de suelo seco de los 24,762 mg/kg de suelos seco de HTP's que el suelo contiene originalmente. La diferencia entre estos dos resultados es del 6 por ciento lo cual indica que no existe una gran diferencia de remoción de HTP's. Por lo tanto se optó por realizar lavados del suelo a concentraciones del 0.1 por ciento que es diez veces menor que el 1.0 por ciento, lo cual equivale a reducir 10 veces más el consumo de Texapon N-40.

La solución es menos viscosa lo cual influye en la movilidad de la solución al hacer pasar los volúmenes de poro necesario para que la desorción se lleve a cabo en las condiciones descritas anteriormente. La desorción de los hidrocarburos depende en gran medida de la formación de micelas donde esto es característico del HLB de cada surfactante y de la concentración micelar crítica, así como de las propiedades fisicoquímicas del suelo, velocidad de reacción, temperatura, pH, concentración de contaminante, fracciones a remover, tiempo de lavado, flujo de alimentación de la solución lavadora, entre otros.

7.5 Efecto de la adición de sales

Las columnas se empacaron con 450 g de suelo contaminado con diesel, la alimentación se realizó con una bomba peristáltica en la cual se reguló el flujo conectado a dos válvulas las cuales alimentaron la solución lavadora a una velocidad

de 5 mL/min. El suelo fue inyectado con una solución de surfactante al 0.1 por ciento con dos diferentes concentraciones al 0, 1 y 2 por ciento respectivamente de NaCl, se utilizó un blanco para comparar el efecto de la adición de sales (Figura 15). Como se observa en el lavado con surfactantes con y sin cloruro de sodio los valores de remoción de TPH's fueron 32 y 40 por ciento en comparación con el blanco 51 por ciento, lo cual equivale a 8,005 y 9,742 mgTPH/kg suelo seco para el caso de NaCl y 12,596.12 mgTPH/kg suelo seco sin sal.

La adición de electrolitos como el NaCl a una solución de surfactantes anionicos puede incrementar el número de agregados micelares (tamaño de la micela) y decrecer la CMC. El incremento en la superficie de cationes sodio (Na^+) puede causar que disminuya la CMC de los surfactantes y el número de agregados incrementa con la estabilización de las micelas.

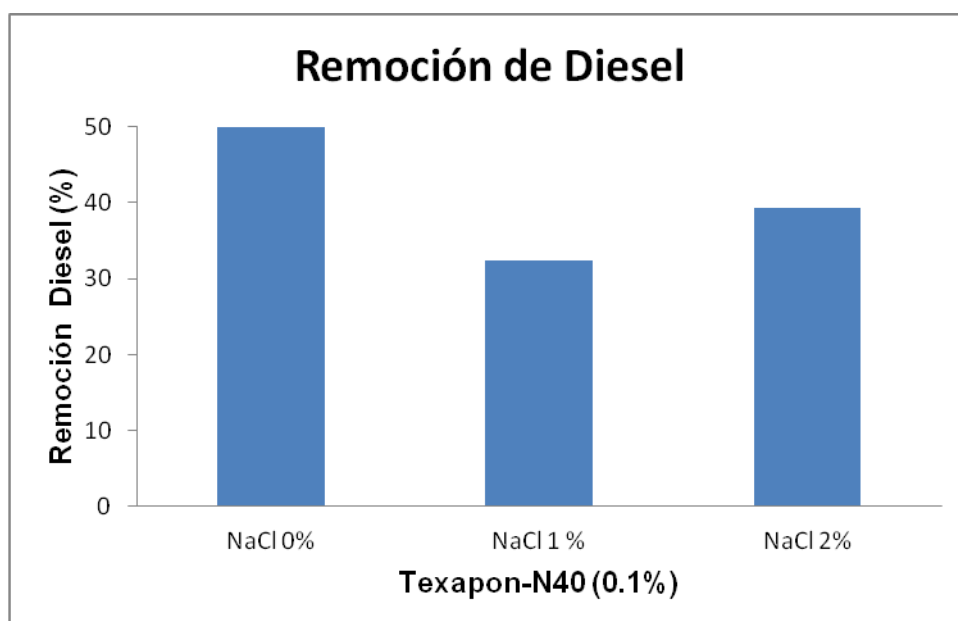


Figura 15. Eficiencias de remoción de Texapon como una función de la concentración de sales.

Algunos experimentos realizados por algunos autores, en los cuales adicionaron NaCl al 2 por ciento en diferentes mezclas y tipos de surfactantes no tuvieron ningún efecto favorable en la remoción de tolueno en comparación cuando no se agregó cloruro de

sodio. En este trabajo en particular se considera que el efecto del NaCl en el lavado para obtener mejores remociones no tiene ningun efecto benefico en comparación con el experimento que se realizó sin sal. No es necesario agregar sal para incrementar la formación de micelas que en este caso en particular no fue favorable.

7.6 Eficiencias de lavado en las columnas de acrílico como una función del tiempo

El lavado del suelo contaminado con diesel se realizó por duplicado en las columnas de acrílico de 725 cm³ a diferentes tiempos de lavado 24, 48, 72, 96 y 120 horas a una velocidad de alimentación de 5 mL/min con Texapon N-40 al 0.1 por ciento (Figura 16).

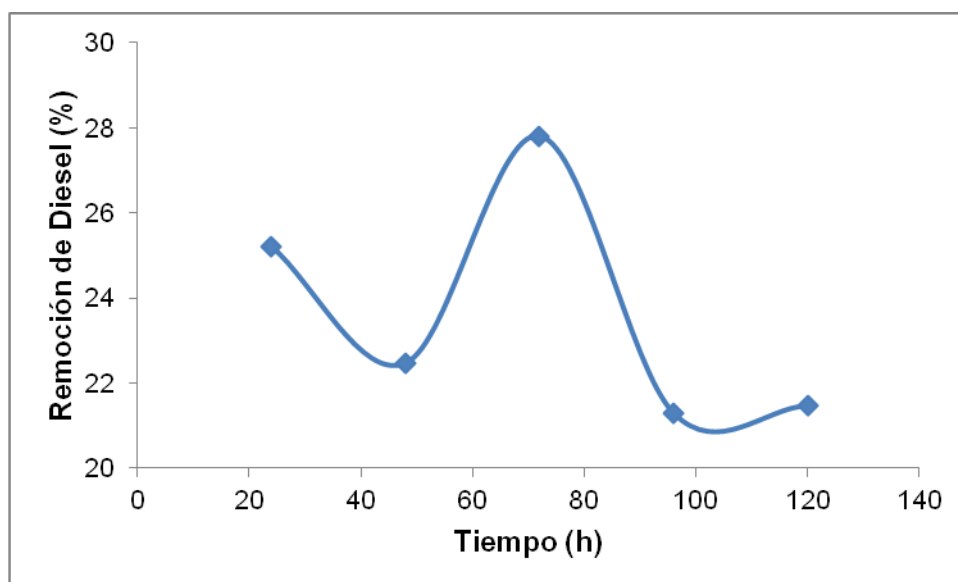


Figura 16. Eficiencias de remoción de TPH's como una función del tiempo.

Los resultados muestran que la remoción de HTP's alimentando con Texapon N-40 al 0.1 por ciento a una velocidad de 5mL/min con un tiempo de lavado de 48, 96 y 120 horas fueron de 22.46, 21.29 y 21.47 por ciento respectivamente lo cual equivale a 5,562.61, 5,271.80 y 5,317.49 mg HTP's removidos/kg suelo seco. Las mayores remociones fueron de 25.22 y 27.80 mg HTP's removidos/kg suelo seco para un

tiempo de lavado de 24 y 72 horas (Tabla 18). Lo cual indica que no existe una gran variación en el porcentaje de remoción de HTP's con respecto al tiempo, el efecto de la compactación y las propiedades fisicoquímicas así como la velocidad de alimentación de la solución lavadora no afectan el proceso de lavado *in situ*.

Los volúmenes de poro variaron de acuerdo al tiempo de lavado, esto indica la cantidad de solución que se hace pasar por volumen de reactor. A mayor tiempo de lavado mayor cantidad de solución gastada por la columna (volúmenes de poro).

Los mg de HTP's de surfactante gastados están en función de la cantidad de HTP's removidos al hacer pasar cierta cantidad de solución por unidad de tiempo, lo cual indica que a menor tiempo de lavado menor consumo de disolución.

Tabla 18. Eficiencias de remoción respecto al tiempo, a una concentración del 0.1 por ciento y una velocidad de alimentación de 5 mL/min.

| Tiempo (h) | HTP's Promedio Removidos (%) | mg HTP's Removidos/kg suelo seco | Volumen de poros | mg HTP's/mg surfactante |
|------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|
| 24 | 25.22 | 6,244.87 | 24.30 | 0.87 |
| 48 | 22.46 | 5,562.61 | 48.59 | 0.39 |
| 72 | 27.80 | 6,884.98 | 72.89 | 0.24 |
| 96 | 21.29 | 5,271.80 | 97.18 | 0.24 |
| 120 | 21.47 | 5,317.49 | 121.48 | 0.15 |

Una vez transcurridas 72 y 96 horas de lavado la cantidad de HTP's removidos fue de 0.24 por cada mg de surfactante gastado, se debe a que el gasto de disolución fue similar de 21 y 28 L. Para el caso de 24, 48 y 120 horas los mg de HTP's removidos/mg surfactante fueron de 0.87, 0.39 y 0.15 respectivamente.

Se observó que al aumentar el tiempo de lavado disminuye la cantidad de HTP's removidos por cada mg de surfactante gastado.

7.7 Efecto de la concentración en la remoción de HTP's

Las condiciones de lavado para el caso del efecto de la concentración son idénticas al caso del efecto del tiempo en la remoción. Se decidió en base del objetivo propuesto variar la concentración de la disolución 0.1, 0.5 y 1.0 por ciento (Figura 17), el tiempo de lavado fue de 72 h debido a que se obtuvieron mayores remociones en este tiempo.

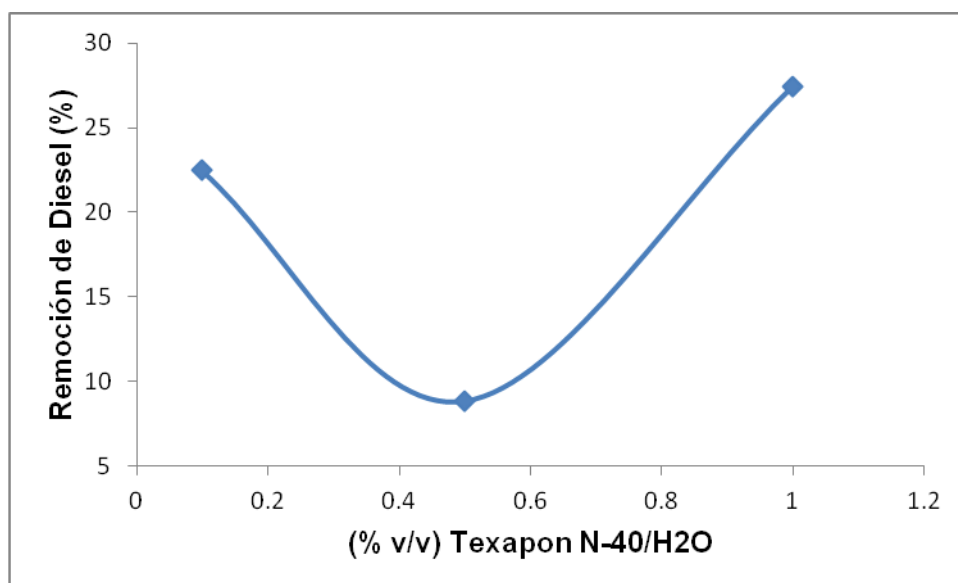


Figura 17. Efecto de la concentración en la remoción de Diesel

El efecto de la concentración del Texapon N-40 muestra el efecto de campana inversa, en el cual se manifiesta una mayor remoción en una solución al uno por ciento lo que equivale a 6794.16 mg HTP's/kg suelo seco (27.43 por ciento). En el caso de las concentraciones de 0.1 y 0.5 por ciento las remociones fueron de 5562.61 y 2192.19 mg HTP's/kg suelo seco lo que equivale a 22.46 y 8.85 por ciento respectivamente (Tabla 19).

Una vez obtenida la mejor concentración y tiempo de lavado, se decidió que los lavados *in situ* posteriores se realizarían a 72 h a una concentración de 0.1 por ciento de Texapon N-40 lo cual implica ahorros en la disolución y beneficios al ambiente.

Los datos presentados en la figura 14 (lavado en viales) muestran que las mayores remociones se encuentran en las concentraciones del 0.1 y 1.0 por ciento, al igual que en este experimento. Estos resultados son interesantes y deben ser objeto de estudio en casos posteriores en el que deben de incluirse la termodinámica del sistema.

Tabla 19. Efecto de la concentración de Texapon N-40.

| Concentración (%) | HTP's Promedio Removidos (%) | mg HTP's Removidos/kg suelo seco | Volumen de poros | mg HTP's/mg surfactante |
|-------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|
| 0.1 | 22.46 | 5,562.61 | 72.89 | 0.19 |
| 0.5 | 8.85 | 2192.19 | 72.89 | 0.08 |
| 1 | 27.43 | 6794.16 | 72.89 | 0.24 |

7.8 Efecto de la velocidad de alimentación y concentración de la disolución

La velocidad de flujo de alimentación se duplicó de 5 a 10 mL/min para ver el efecto en la remoción de los HTP's, debido al rompimiento de los enlaces covalentes que se originan por el esfuerzo de corte generado por las condiciones generadas dentro del reactor. El tiempo de lavado fue de 72 h. La concentración de la solución empleada fue de 0.05, 0.1, 0.5 y 1.0 por ciento (Figura 18).

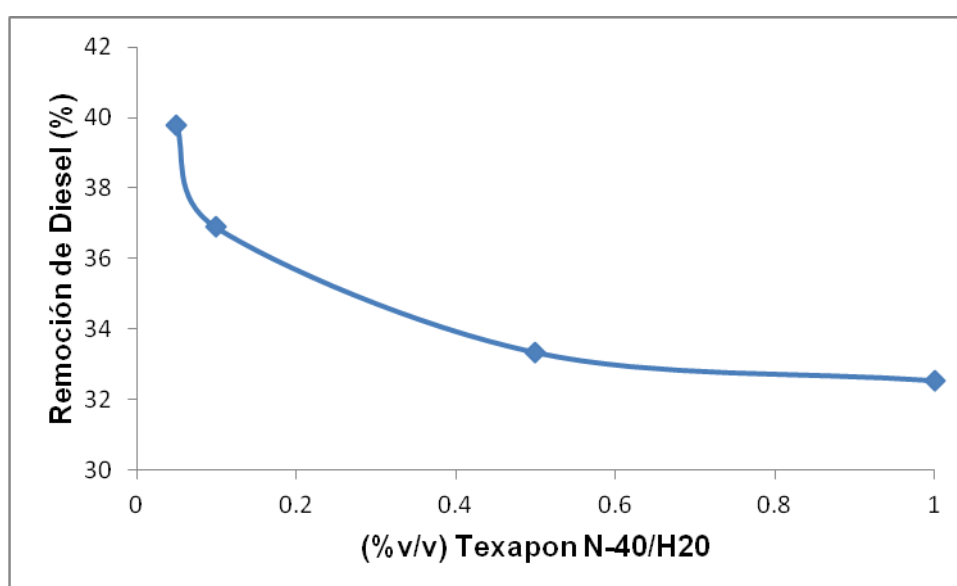


Figura 18. HTP's removidos como una función de la concentración y flujo de alimentación.

Los resultados obtenidos fueron de 9,955.27, 9,135.98, 8,256.30, 8,057.58 mg HTP's removidos/kg suelo seco equivalentes a 39.80, 36.89, 33.34 y 32.54 por ciento, respectivamente (Tabla 20).

Se puede observar que a estas condiciones de lavado en los reactores, la mayor remoción de HTP's fue de 39.80 por ciento, siendo muy parecido al 51 por ciento de remoción obtenido al realizar el lavado en los viales en condiciones controladas de agitación y temperatura. Por lo que debemos de tomar en cuenta que no podemos llegar más allá de la remoción obtenida en el equilibrio de la reacción química.

Tabla 20. Remoción de HTP's a diferentes concentraciones de Texapon N-40 a una velocidad de 10 mL/min.

| Concentración (%) | HTP's Promedio Removidos (%) | mg HTP's Removidos/kg suelo seco | Volumen de poros | mg HTP's/mg surfactante |
|-------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|
| 0.05 | 39.80 | 9,955.27 | 72.89 | 0.24 |
| 0.1 | 36.89 | 9,135.98 | 72.89 | 0.32 |
| 0.5 | 33.34 | 8,256.30 | 72.89 | 0.29 |
| 1 | 32.54 | 8,057.58 | 72.89 | 0.28 |

A una velocidad de alimentación de 10 mL/min y a una concentración de 0.05 por ciento de surfactante este es el mejor resultado para un lavado *in situ* a las condiciones de operación indicadas anteriormente.

La capacidad de desorción de los HTP's de fracción media se ve afectada por la velocidad del fluido y concentración así como el tiempo de lavado, lo cual se ve reflejado en los objetivos particulares planteados originalmente.

La curva que se muestra en la figura 18 es decreciente en la cual la desorción es diferente a lo resultados mostrados con anterioridad en este trabajo experimental que muestran un movimiento de ondas, obteniendo diferentes picos de remoción.

La variación en la eficiencia de remoción depende de la velocidad de flujo, concentración y tipo de surfactante empleado (Figura 19).

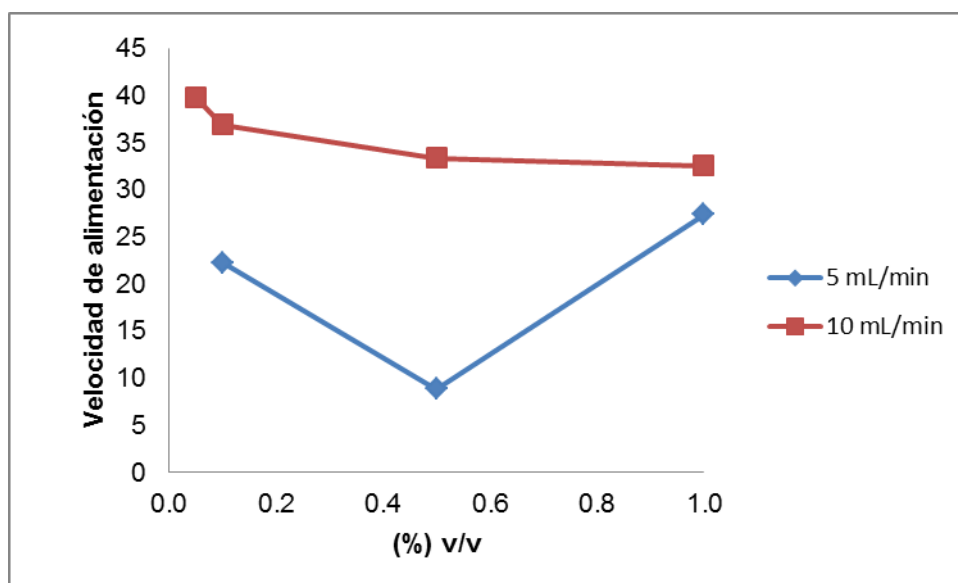


Figura 19. Efecto de la velocidad de alimentación vs concentración de surfactante.

7.9 Efecto del lavado con H₂O y un biosurfactante

La desorción de HTP's a velocidad de flujo alimentación de 5 mL/min a 72h con agua y algarrobo al 0.1 por ciento mostraron remociones del 25.88 y 18.13 por ciento equivalentes a 6409.06 y 4489.39 mg HTP's removidos/Kg suelo seco respectivamente (Tabla 21).

Tabla 21. HTP's removidos a una velocidad de alimentación de 5 mL/min, con Agua, Texapon N-40 0.5% y algarrobo 0.1%.

| Medio | HTP's Promedio Removidos (%) | mg HTP's Removidos/kg suelo seco | Volumen de poros | Mg HTP's/mg surfactante |
|--------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|
| Agua | 25.88 | 6,409.06 | 72.89 | 0.22 |
| Texapon N-40 | 36.89 | 9,135.98 | 72.89 | 0.32 |
| Algarrobo | 18.13 | 4,489.39 | 72.89 | 0.16 |

Las remociones con agua 25.88 por ciento son similares a los resultados presentados en el experimento realizado con surfactante al 0.1 por ciento a una velocidad de alimentación de 5 mL/min, para las 24 y 72 h de lavado 25.22 y 27.80 por ciento, respectivamente. El efecto de la concentración al 1.0 por ciento y 72 h de lavado muestra una remoción del 27.43 por ciento.

El agua sin surfactante muestra casi el mismo efecto de lavado, a excepción del caso en el que se duplica la velocidad de alimentación a 10 mL/min y una concentración del 0.05 por ciento, lo cual nos da una remoción cercana al 40 por ciento de HTP's totales.

Este caso de estudio mostró el efecto del Texapon N-40 como tensoactivo en la remediación *in situ* de suelos contaminados con diesel.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8

Las propiedades fisicoquímicas del suelo indican si es apto para procesos de remediación química o biorremediación. En el cuál podemos destacar que para este tipo de suelo Franco-Arenoso de las 11 clasificaciones que existen, se observa que los procesos de desorción de HTP's no fueron los esperados.

El pH del suelo sin contaminar fue de 8.51 lo cual indica que es muy alcalino, el contenido de materia orgánica es muy pobre de 0.94 y la humedad del 2.27 por ciento lo cual minimiza la posibilidad de que exista un proceso de biorremediación a largo plazo, la densidad aparente y real fue del 0.91 y 1.86 respectivamente, la porosidad fue del 51 por ciento lo cual es favorable para que exista un buen drenaje en el suelo. Esto es benéfico para que exista una libre difusión del contaminante y de la disolución.

La caracterización de metales presentes mostró una mayor proporción de metales divalentes en comparación con los monovalentes, el Ca^{2+} y Mg^{2+} .

El contenido original de HTP's en el suelo sin contaminar y contaminado (3 por ciento) después de homogenizarlo por dos meses fue de 80.12 y de 24,762 mg HTP's/kg respectivamente. La pérdida de HTP's durante los dos meses que se homogenizó, puede ser debido a procesos de evaporación de las fracciones ligeras o a sistemas de biorremediación que fue inducida indirectamente por la cantidad de microorganismos que pudieron estar presentes en el suelo. Los análisis realizados al suelo contaminado para determinar el tipo y cantidad de hidrocarburos presentes indica que se encuentran fracciones medias con cadenas que van de C10 - C28. No se identificaron BTEX ni hidrocarburos poliaromaticos (HAP's).

No se ha reportado el uso del Texapon N-40 como sustancia lavadora en la remediación de suelos contaminados *in situ* a gran escala o a nivel planta piloto.

El mejor surfactante sintético que aportó mejores resultados para este experimento fue el Texapon N-40, debido a su capacidad de desorción que fue del 50 por ciento en los

lavados realizados en los viales en condiciones controladas de temperatura y agitación.

Al modificar la velocidad de alimentación de 5 a 10 mL/min a diferentes concentraciones de surfactante incluyendo un punto de medición adicional 0.05 por ciento y 72 h de lavado, se obtuvieron remociones del 39.80 por ciento en el lavado en columnas. Comparándolo con el 50 por ciento de remoción que se obtuvo en los lavados realizados en viales.

La adición de cloruro de sodio al 1 y 2 por ciento con Texapon N-40 al 0.1 por ciento, no tuvo ningún efecto significativo en la remoción de TPH's siendo del 32 y 40 por ciento respectivamente en comparación con el blanco sin NaCl que fue del 51 por ciento, en el lavado realizado en viales. El efecto de la sal no fue mayor del esperado siendo esta una limitante en el proceso de desorción debido a que disminuye la formación de micelas. En este caso de estudio no resulto benéfico la adición de sales.

El efecto del tiempo de lavado con respecto a la concentración del 0.1 por ciento y velocidades de lavado de 5 mL/min en las columnas mostraron remociones del 25.22 y 27.80 respectivamente para 24 y 72 horas. Esto indica que el efecto del tiempo no fue una variable determinante en la remoción de diesel.

La concentración se varió con la finalidad de obtener la mayor remoción en el menor tiempo posible, a una concentración del 0.1 por ciento la desorción del contaminante fue del 22.46 por ciento, en comparación con la concentración al 1.0 por ciento que fue del 27.43 por ciento a 72 h de lavado. La diferencia de remoción es del 5 por ciento, por lo tanto se concluye que a una dosis diez veces menor se tienen casi los mismos beneficios obteniendo ahorros en materias primas y energía.

El algarrobo fue el biosurfactante que obtuvo las mayores tazas de remoción en viales siendo del 45 por ciento, en las columnas el lavado se realizó a una velocidad de

alimentación de 5 mL/min en un tiempo de 72 h donde la desorción fue de 18.13 por ciento, lo cual implica que se ve limitado por las condiciones de trabajo en la columna y corrobora la ventaja de emplear surfactantes sintéticos para este caso de estudio.

El agua sin surfactante muestra casi el mismo efecto de lavado, a excepción del caso en el que se duplica la velocidad de alimentación a 10 mL/min y una concentración del 0.05 por ciento, lo cual nos da una remoción cercana al 40 por ciento de HTP's totales.

La capacidad de desorción de los HTP's de fracción media se ve afectada por la velocidad del fluido y concentración así como el tiempo de lavado.

Se puede concluir en este experimento que a una velocidad de alimentación de 10 mL/min y a una concentración de 0.05 por ciento de Texapon N-40 fue el mejor resultado para un lavado *in situ* a las condiciones de operación indicadas en este trabajo anteriormente.

Con el avance de las manchas urbanas en un desarrollo desordenado y no sustentable, dichos sitios contaminados se han convertido en problemas de salud pública, problemas sociales y políticos. El uso de suelo no regularizado asociado al manejo inadecuado de hidrocarburos trae consigo problemas de toda índole que no pueden ser resueltos desde una sola perspectiva. Los vehículos en mal estado, el robo de combustibles y el uso indiscriminado de fuentes de energía no renovables causan daños irreversibles al ambiente y su entorno.

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 9

El lavado de suelos contaminados asistido con surfactantes y biosurfactantes es una tecnología que requiere que se profundice en el estudio de algunas o ciertas variables como son el tipo de tensoactivo, concentración, velocidad de alimentación, tiempo de lavado, fenómenos de difusión, desorción, propiedades termodinámicas, entre otros. Los cuales determinan el éxito o fracaso de la técnica empleada.

El uso de Texapon N-40 no debe limitarse a ciertos casos de estudio, puede existir su aplicación para fracciones ligeras, medias o pesadas dependiendo de las características del proyecto en sí.

Se debe tomar en cuenta el ahorro de energía y consumibles, así como la ingeniería del proyecto para que se obtengan las mayores tasas de remoción en el menor tiempo posible a los costos más bajos posibles.

REFERENCIAS

CAPÍTULO 10

1. Álvarez, P; Guevara, E. (2003). Biorremediación y atenuación de acuíferos contaminados por sustancias químicas peligrosas. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Valencia, Estado Carabobo.
2. Bernardez, L; Therrien, R; Lefebvre, R; Martel, R. (2009). Simulation the injection of micellar solutions to recover diesel in a sand column. Journal of Contaminant Hydrology., (103), 99-108.
3. Brusseau, M; Nelson, N; Costanza-Robinson, M. (2003). Partitioning tracer test for characterizing immiscible-fluid saturations and interfacial areas in the vadose zone. Vadose Zone Journal., (2), 138-147.
4. Casanova, M. (2006). Descripción y Propiedades de los Suelos. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas.
5. Eve; R, Smoley, C. (1992). Biorremediation of petroleum contaminated sites. 28, A-9, A-10, A-21-A-39.
6. Eweis, J. (1999). Principios de biorrecuperación. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
7. Gaganis, P; Kjeldsen, P; Burganos, V. (2004). Modeling natural attenuation of multicomponent fuel mixtures in the vadose zone: use of field data and evaluation of biodegradation effects. Vadose Zone Journal., (3), 1262-1275.
8. Hagenhoff, K; Dong, J. Aqueous solution of anionic surfactants mixed with soils show a synergistic reduction in surface tensión. Water Air Soil Pollut., (209), 3-13.
9. Henry, E; Smith, J. (2003). Surfactant-Induced flow phenomena in the vadose zone: a review of data and numerical modeling. Vadose Zone Journal., (2), 154-167.
10. Hillel, D; Rosenzweig, C; Powlson, D; Scow, K; Singer, M; Sparks, D. (2004). Encyclopedia of soils in the environment. Academic Press; 1 edition. 149-163, 180-188.

11. Instituto Nacional de Ecología. INE (2007).
12. Iturbe, R; Flores-Serrano, R; Castro, A; Flores, C; Torres, L. G. (2010). Subsoil TPH contamination in two oil pipeline pumping stations and one pipeline right-of-way in north Mexico. Elsevier Journal of Environmental Management., xxx, 1-7.
13. Iturbe, R; Flores, C; Flores, R; Torres, L. G. (2005). Subsoil TPH and other petroleum fractions-contamination levels in an oil storage and distribution station in north-central Mexico. Elsevier Chemosphere., (61), 1618-1631.
14. Javaux, M; Vanclooster, M. (2004). In situ Long-Term transport through a layered, nonsaturated subsoil. 1. Data set, interpolation methodology, and results. Vadose Zone Journal., (3), 1322-1330.
15. Juana B. Principios de biorrecuperación. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. (1999).
16. Kang, S; Kim, Y; Shin, J; Kim, E. (2009). Enhanced Biodegradation of Hydrocarbons in Soil by Microbial Biosurfactant, Sophorolipid. Appl Biochem Biotechnol., (160), 780–790.
17. Khalladi, R; Benhabiles, O; Bentahar, F; Moulai-Mostefa, N. (2009). Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil. Journal of Hazardous Materials., (164), 1179-1184).
18. Lee, M; Kang, H; Do, W. (2005). Application of nonionic surfactant-enhanced in situ flushing to a diesel contaminated site. Elsevier Water Research., (39) 139-146.
19. Lee, D; Ryu, J; Kim, E. (2003). Comparison of pH and counter-ion effect in surfactant-assisted remediation. Geosciences Journal., 7(2), 163-167.
20. Linares, L; Rojas, N; Roldán, T; Ramírez, M; Zegarra, H; Uribe, R; Reyes, R; Flores, D; Arce, J. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados., Instituto Mexicano del petróleo.

21. López, J; Iturbe, R; Torres, L. G. (2004). Washing of soil contaminated with PAHs and heavy petroleum fractions using two anionic and one ionic surfactant: effect of salt addition., 39 (9), 2293-2306.
22. Martínez, V; López F. (2000). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. Terra., (19), 9-17.
23. McMillen, S; Magaw, R; Carovillano, R. (2001) Risk-Based Decision-Marking for Assessing Petroleum Impacts at Exploration and Production Sites. Petroleum Environmental Research Forum The United States Department of Energy.
24. Mol, J. (1999). An analysis of the remediation of oil contaminated refinery sites. Environmental Management and Health., 10(1), 37-40.
25. Mulligan, C.N; Yong, R. N; Gibbs, B. F. (2001). Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. Elsevier Engineering Geology., (60), 371-380.
26. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.
27. Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.
28. Oostrom, M; Dane, J; Wietsma, T. (2006). A review of multidimensional, multifluid intermediate-scale experiments: nonaqueous phase liquid dissolution and enhanced remediation. Vadose Zone Journal., (5), 570-598.
29. Park, S; Bielefeldt, A. (2005). Non-ionic surfactant flushing of pentachlorofenol form NAPL-contaminated soil. Elsevier Water Research., (39), 1388-1396.
30. Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados. SEMARNAT (2010).
31. Quinto Informe de Labores. SEMARNAT (2011).
32. Quinto Informe de Labores. SENER (2011).

33. Sabatini, D; Knox, R; Harwell, J. ACS Symposium Series. Surfactant-Enhanced Subsurface Remediation. (1995). American Chemical Society, Washington, DC. 1-5, 38-53, 65-79, 161-190, 280-285.
34. Salager, J; Fernandez, A. (2004). Cuaderno FIRP S-301-PP. Surfactantes. Universidad de los Andes.
35. Sarmiento, R. (2008). Propiedades físicas y químicas del biodiesel vs diesel del petróleo. Energía a debate.
36. Schwab, A; Wetzell, S; Pekarek, S; Banks, M. (1999). Extraction of petroleum Hydrocarbons from Soil by Mechanical Shaking. Environ. Sci. Technol., (33), 1940-1945.
37. Shaw, D. (1977). Introducción a la química de superficies y coloides. Alhambra S.A. R.E. Segunda edición en español.
38. Shin, K; Kim, K. (2004). A biosurfactant-enhanced soil flushing for the removal of phenanthrene and diesel in sand. Environmental Geochemistry and Health., (26), 5-11.
39. Thomasson, M; Wierenga, P; Ferré, T. (2006). A field application of the scaled-predictive method for unsaturated soil. Vadose Zone Journal., (5), 1093-1109.
40. Torres, L. G; Iturbe, R; Flores, C; Chávez, C; Ramírez, A. (2004). In situ Flushing of Contaminated Soils from a Refinery: Organic Compounds and Metal Removals. Remediation Spring., 14(2), 141-152.
41. Torres, L. G; Climent, M; Saquelares, J; Bandala, R; Urquiza, G; Iturbide. R. (2007). Characterization and treatability of a contaminated soil from an oil exploration zone. Int. J, Environ. Sci. Tech., 4(3), 311-322.
42. Torres, L. G; Riojas, H; Mondaca, I; Balderas, J. (2010). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

43. Torres, L. G; Lemus, X; Iturbe, R. (2007). Do the characteristics of crude oil in contaminated soils affect its removal by washing? *Land Contamination and Reclamation.*, 15(4), 1-9.
44. Totsche, K; Jann, S; Kogel-Knabner, I. (2006). Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, dissolved organic carbon, and suspended matter from disturbed NAPL-Contaminated gravelly soil material. *Vadose Zone Journal.*, (5), 469-479.
45. Urum, K; Pekdemir, T. (2004). Evaluation of biosurfactants for crude oil contaminated soil washing. *Elsevier Chemosphere.*, (57), 1139-1150.
46. Volke, T; Velasco, J. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT.
47. Wets, C; Harwell, J. (1992). Surfactants and subsurface remediation. *Environ. Sci. Technol.*, 26(12), 2324-2330.
48. William, C; Anderson, P. (1993). Innovative site remediation technology. *Soil Washing/Soil Flushing*. American Academy of Environmental Engineers.
49. Zhou, Q; Birkholzer, J; Javandel, I; Jordan, P. (2004). Modeling three-dimensional groundwater flow and advective contaminant transport at a heterogeneous mountainous site in support of remediation. *Vadose Zone Journal.*, (3), 884- 900.

ANEXO

“A”

Lavado de suelos.

Para determinar la cantidad de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) que pueden ser reconocidos del suelo contaminado se prepararon se realizo por la técnica de extracción por reflujo Soxhlet.

Extracción por reflujo (Soxhlet). La extracción Soxhlet es una de las técnicas analíticas más ampliamente usadas; es un procedimiento para la extracción de compuestos orgánicos no volátiles y semivolátiles de sólidos, como suelos, lodos y residuos. Este método asegura el contacto íntimo de la matriz de la muestra con el solvente de extracción. La extracción de hidrocarburos del petróleo por Soxhlet provee fracciones de C6 a C50. Para la óptima extracción de los compuestos orgánicos, los sólidos deben estar en partículas pequeñas; mientras más pequeñas sean las partículas, más área de superficie y contacto y, por lo tanto, mejor extracción. Así, sólidos de mayor tamaño deben ser reducidos a pequeñas partículas antes de la extracción. El desarrollo del método de extracción Soxhlet incluye encontrar un solvente o mezclas de solventes que tengan una alta afinidad por los analitos y una baja afinidad por la matriz de la muestra sólida. El solvente debe tener una alta volatilidad porque debe ser removido al final de la extracción para concentrar el analito de interés (Weisman, 1998).

Fundamento. Este método consiste en extraer los hidrocarburos contenidos en el suelo, mediante la acción de un solvente orgánico volátil apropiado, que es reflujo a través de la muestra varias veces durante un tiempo determinado. El solvente es evaporado y posteriormente condensado en un refrigerante, se le hace pasar por la muestra y se le regresa al origen para ser nuevamente evaporado. La muestra sólida es mezclada con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua

residual, se le coloca en un dedal o cartucho de papel o fibra de vidrio y se usa un solvente orgánico apropiado para su extracción en un equipo Soxhlet.

Mediante los reflujos del solvente y la temperatura se permite el contacto íntimo de la muestra con el solvente de extracción, de esta manera se logra la liberación de los hidrocarburos presentes en la muestra. El extracto orgánico se concentra (si es necesario) o bien se evapora para realizar el intercambio de solvente, acorde con el método de cuantificación.

Interferencias. Los solventes, reactivos, material de cristalería y otros artículos utilizados en los procedimientos de preparación de la muestra pueden contener impurezas (como hidrocarburos residuales). Por lo que se requiere confirmar que estos materiales estén libres de interferencias, bajo las mismas condiciones de análisis, mediante la corrida de un blanco, utilizando reactivos puros. La limpieza rigurosa de los materiales por utilizar es necesaria y, en ocasiones, dependiendo del grado de pureza de solvente, es conveniente purificarlo por destilación.

Esta Tesis la terminé de escribir a los 26 días del mes Junio del 2012, en nuestra gran metrópoli “La Ciudad de México”.

Lo último que puedo comentar es que voy en busca de nuevas metas y desafíos...

¡Esperando a que nuevos vientos me lleven por caminos inesperados!

Oscar Piña Maldonado