

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**Lavado de suelos contaminados con diesel utilizando  
surfactantes**

Por:

**NANCY CANO MARTAGÓN**

**TESIS**

Presentada como Requisito parcial para

Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL.**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Octubre del 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

**Lavado de suelos contaminados con diesel utilizando  
surfactantes**

POR

Nancy Cano Martagón

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito para  
obtener el título de:

**INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL**

Aprobaba por:

Dr. Edmundo Peña Cervantes  
Presidente

Mc. Fidel Maximiano Peña Ramos  
Coasesor

Dr. Ruben López Cervantes  
Coasesor  
Universidad Agraria  
"ANTONIO NARRO"

Dr. Luis Samaniego Moreno  
Coordinador de la División de Ingeniería



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México Octubre 2015

## AGRADECIMIENTOS

### *A Dios:*

*Por darme la oportunidad de estar aquí concluyendo una etapa más de mi vida, permitirme vivir al lado de todos mis seres queridos, por cada uno de los momentos vividos, gracias a él que siempre está a mi lado y nunca me abandona.*

### *A mi Familia:*

*Quien agradezco infinitamente su apoyo moral, su cariño y su motivación.*

### *A mi Alma Mater:*

*Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por cobijarme en sus aulas, por la enseñanza que me dio, gracias a esta casa por hacerme una profesionista.*

### *A mis Asesores:*

*Dr. Edmundo Peña Cervantes*

*Mc. Fidel Maximiano Peña Ramos*

*Dr. Rubén Cervantes López*

*Gracias*

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de investigación al ser que más amo en la vida mi pequeño hijo:*

*J. GAEL MONTELONGO CANO*

*Y*

*A MIS PADRES*

*Quienes son mi orgullo y mi gran motivación: quienes libran mi mente de todas las adversidades que se presentan, y me impulsan cada día a superarme en la carrera de ofrecerles siempre lo mejor. No fue fácil, eso lo sé, pero tal vez si no los tuviera conmigo, no lo habría logrado. Son mi razón de sonreír.*

*Los amo*

## RESUMEN

En México la contaminación de los suelos son propiciados principalmente por la industria minera y petroquímica. La restauración está enfocada a reutilizar los suelos que han sufrido una emergencia ambiental, la cual causa la infertilidad de suelos en nuestro país. El lavado de suelos es un método efectivo donde se emplean suelos que han sufrido un deterioro y puedan ser reutilizados en la agricultura. No obstante, este método surge debido a las estadísticas reportadas por la PROFEPA, donde el diesel representa un 7% de contaminación a nivel nacional. El objetivo principal fue establecer el surfactante y el tiempo adecuado de extracción de diésel en el lavado de suelos. El presente trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Se tomaron 2 muestras de suelo, según la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, establece especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Se intemperizó un tiempo aproximado de tres meses, se obtuvo la caracterización física y química. Para la preparación de los surfactantes, se pesaron 15 g de jabón surfactante 1 anionico lineal y para el surfactante 2 anionico y no iónico, se diluyo en 1500 ml de agua (1%) y se homogenizó con el agitador magnético. Cabe mencionar, que entre más bajo el valor de  $\text{mg.kg}^{-1}$ , la mejor extraccion fue a las 24 h, donde se encontró menor cantidad de diesel, el surfactante uno independientemente del suelo, para el T1 y T3 los resultados son más significativos y el surfactante 2 éste tiene un comportamiento más inestable.

Palabras clave: Lavado, surfactante, anionico, no iónico.

Correo Electronico: Nancy Cano Martagón, [mcnancy93@gmail.com](mailto:mcnancy93@gmail.com)

## TABLA DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| TABLA DE CONTENIDO .....                              | vi  |
| ÍNDICE DE CUADROS .....                               | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                | vii |
| JUSTIFICACIÓN .....                                   | 9   |
| OBJETIVOS .....                                       | 10  |
| Objetivo general.....                                 | 10  |
| Objetivos específicos.....                            | 10  |
| HIPÓTESIS .....                                       | 10  |
| REVISIÓN DE LITERATURA .....                          | 11  |
| Contaminación del Suelo .....                         | 11  |
| Fuentes de contaminación en México.....               | 13  |
| La recuperación de suelos contaminados.....           | 14  |
| Diesel .....  | 16  |
| Técnicas de Remediación.....                          | 17  |
| Clasificación de Tecnologías de Remediación.....      | 17  |
| Lavado de suelos .....                                | 19  |
| Lavado <i>ex situ</i> .....                           | 22  |
| Lavado <i>In situ</i> .....                           | 23  |
| Tecnologías de remediación utilizadas en México ..... | 25  |
| Surfactantes .....                                    | 27  |
| La micela.....  | 29  |
| Ventajas y desventajas de los surfactantes .....      | 30  |
| Clasificación de los surfactantes.....                | 30  |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....                            | 34  |

|                        |    |
|------------------------|----|
| CONCLUSIONES.....      | 43 |
| LITERATURA CITADA..... | 44 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS, MÉTODOS EMPLEADOS PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE LOS SUELOS.....   | 35                                   |
| CUADRO 2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS UTILIZADOS EN ESTE EXPERIMENTO. ....  | <b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b> |
| CUADRO 3. COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE DIESEL (MG.KG <sup>-1</sup> ) EVALUADO EN CUATRO TRATAMIENTOS (DOS TIPOS DE SUELOS Y DOS SURFACTANTES) Y EN CINCO TIEMPOS, UTILIZANDO EL MÉTODO DE WB. ....         | 39                                   |
| CUADRO 4. COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE DIESEL (MG.KG <sup>-1</sup> ) EVALUADO EN CUATRO TRATAMIENTOS (DOS TIPOS DE SUELOS Y DOS SURFACTANTES) Y EN CINCO TIEMPOS, UTILIZANDO EL MÉTODO DE CALCINACIÓN..... | 40                                   |
| CUADRO 5. COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE DIESEL (MG.KG <sup>-1</sup> ) EVALUADO EN CUATRO TRATAMIENTOS (DOS TIPOS DE SUELOS Y DOS SURFACTANTES) Y EN CINCO TIEMPOS, UTILIZANDO EL MÉTODO E HTP'S.....        | 41                                   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1. PROCESO DE LAVADO DE SUELO. ....  | 22 |
| FIGURA 2. LAVADO DE SUELO IN SITU. ....   | 24 |
| FIGURA 3. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS UTILIZADAS EN MÉXICO. ....                     | 26 |
| FIGURA 4. ESQUEMA DE CÓMO ACTUA EL SURFACTANTE.....   | 28 |
| FIGURA 5. RELACIÓN ENTRE NÚMERO CAPILAR Y RECUPERACIÓN DE CRUDO. ....                         | 33 |
| FIGURA 6 UBICACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....  | 34 |
| FIGURA 7. TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN LA EXTRACCIÓN DE DIESEL CON ACETONA, CON 5 TIEMPOS. .... | 42 |

## INTRODUCCIÓN

En México existen sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos orgánicos e inorgánicos, que propician la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina de los hidrocarburos. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (1999), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación fue de 25,967 km<sup>2</sup>. Las entidades más afectadas por las emergencias ambientales son Veracruz, Tamaulipas, Oaxaca, Hidalgo, Puebla, Guanajuato, San Luis Potosí, Jalisco, Tabasco y Coahuila. No obstante, el derrame de hidrocarburos afecta de manera irracional el territorio mexicano, causando la pérdida de flora y fauna.

Sin embargo, 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.

La restauración está enfocada a reutilizar los suelos que han sufrido una emergencia ambiental, la cual causa la infertilidad de gran parte de suelos en nuestro país. Por ello es que se busca proporcionar una alternativa para retomar el uso que anteriormente se le daba. Entre las técnicas más empleadas hasta ahora para la eliminación de los hidrocarburos presentes en los suelos, podemos citar la extracción de hidrocarburos por vacío, el lavado del suelo contaminado con agua, la incineración y la recuperación electrocinética entre otros. Para la remediación de suelos contaminados, la técnica de lavado con surfactantes es una entre muchas para recuperar suelos contaminados con hidrocarburos.

El uso de la técnica de lavado con surfactantes aniónico lineal, aniónico y no iónico, se empleara a nivel laboratorio para recuperar suelos contaminados con diesel, posteriormente analizarlos con algunos métodos, que detectan el carbono orgánico y la cantidad de hidrocarburos totales de petróleo residuales (HTP'S) y de esta manera cuantificar el diesel eliminado con surfactantes y poder determinar la eficiencia del lavado. Una vez derramado éste contaminante en el suelo, la mayoría

de los compuestos alifáticos se pierden por volatilización, mientras que algunos hidrocarburos como los policíclicos persisten en la superficie, generando un gran impacto en sus efectos tóxicos e inconsistentes para los seres vivos. Así mismo, recuperar los suelos agrícolas y volverlos fértiles.

## **JUSTIFICACIÓN**

En todo el país existen problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión. Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes como; los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (INEGI-SEMARNAP, 1997).

La remediación de suelos es una de las posibles soluciones al derrame de crudo en México, ya que diversos procesos urbanos han llevado al deterioro del suelo, debido principalmente derrames de hidrocarburos (gasolina y diesel), también la disposición inadecuada de residuos peligrosos y degradación de predios industriales con la disposición de residuos mineros.

Para recuperación de suelos existen diferentes metodologías, entre ellas unas con mayor eficiencia. El lavado de suelos es un método efectivo donde se emplean suelos que han sufrido un deterioro y puedan ser reutilizados en la agricultura. No obstante, este método surge debido a las estadísticas reportadas por la PROFEPA, donde el diesel representa un 7% de contaminación a nivel nacional.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Establecer el surfactante y el tiempo adecuado de extracción de diésel en el lavado de suelos.

### **Objetivos específicos**

- Especificar el surfactante y el tiempo más eficiente para el lavado.
- Obtener las características físicas y químicas del suelo después de lavado con surfactantes.

## **HIPÓTESIS**

Los surfactantes anionico lineal son más efectivos para la recuperación de suelos contaminados con diesel por medio del lavado.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Contaminación del Suelo

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en unas concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas, aunque también se puede producir de forma natural o en el interior cuando los procesos de edificación liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos. Un ejemplo de esto último lo tenemos en suelos muy evolucionados formados sobre rocas serpentizadas con altos contenidos en metales pesados como el Cr, Ni, Cu y Mn, entre otros, que se concentran en los suelos a medida que la intensa edafogénesis produce el lavado de otros constituyentes esenciales como el Ca, Mg. Conforme se desarrolla esta concentración residual metálica, estos elementos que inicialmente eran constituyentes no asimilables de los minerales primarios pasan a formas más activas, solubles y biodisponibles que influyen negativamente sobre la actividad biológica. Como ya se ha señalado, las propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas del suelo controlan en gran medida los ciclos biogeoquímicos superficiales, en los que actúa como un reactor complejo que sirve de elemento protector de otros medios más sensibles frente a elementos contaminantes. Así, el suelo ejerce su labor protectora a través de su poder de amortiguación o capacidad natural de depuración de la contaminación. Esta atenuación de los elementos nocivos contaminantes se realiza, entre otras, a través de reacciones de complejación, reacciones de adsorción y desorción, reacciones de precipitación y disolución, reacciones de oxidorreducción, reacciones ácido-base y reacciones

derivadas de procesos metabólicos. Todas estas reacciones están estrechamente controladas por propiedades del suelo como su textura, estructura, porosidad, capacidad de intercambio catiónico, pH y la actividad microbológica. En cualquier caso, hay que tener muy presente que el poder de amortiguación de un suelo no es ilimitado y cuando se rebasa, el suelo deja de ser eficaz como sumidero de la contaminación, llegando incluso a invertirse el proceso y a convertirse en una fuente de contaminación para los organismos del suelo y para el medio circundante. A la hora de abordar el estudio de la contaminación de un suelo no basta sólo con detectar la presencia de la sustancia o sustancias contaminantes sino que su concentración debe superar la carga crítica o máxima cantidad permitida en el suelo sin que se produzcan efectos nocivos que no puedan ser contrarrestados por el poder de amortiguación del suelo. Se deduce que distintos suelos van a reaccionar de forma diferente ante la presencia de un mismo contaminante o de una misma cantidad de contaminante. Esta reacción estará condicionada por factores como la vulnerabilidad específica de cada suelo, que representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes y que está muy relacionada con el poder de amortiguación del suelo, de forma que cuanto menor sea esta capacidad de amortiguación del impacto del contaminante mayor será su vulnerabilidad. Así mismo, el grado de vulnerabilidad de cada suelo frente a la contaminación depende de la intensidad de la contaminación y de la velocidad con que se producen los cambios negativos en las propiedades del suelo en respuesta a esa contaminación. Además, el grado de contaminación de un suelo no puede ser estimado exclusivamente a partir de los valores totales de los contaminantes frente a determinados valores guía, sino que es necesario considerar la biodisponibilidad del contaminante o su posible asimilación por los organismos del suelo, determinada por la competencia entre el sistema radicular de la planta, la solución del suelo y la fase sólida del suelo la movilidad, que regulará su distribución y transporte en el suelo o a otros medios; y la persistencia, que controlará la duración de su efecto pernicioso en el suelo. Todos estos conceptos permiten evaluar los riesgos potenciales de

determinadas actividades contaminantes y planificar actuaciones de acuerdo con el tipo de suelo, aunque es necesario recalcar que la propia heterogeneidad del suelo puede dificultar en muchos casos la caracterización de estos parámetros. Los agentes potencialmente contaminantes del suelo están fundamentalmente asociados a residuos derivados de actividades industriales, mineras, agrícolas y ganaderas. Las principales agentes de contaminación en los suelos son: metales pesados, lluvias ácidas, salinización, fitosanitarios, explotaciones mineras, contaminantes orgánicos (INE, 2002).

### **Fuentes de contaminación en México**

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP). De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) (INEGI-SEMARNAP, 1997).

#### Industria petroquímica

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas (Quadri, 1994; PROFEPA, 2000).

#### Industria minera

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica. En general, todas las etapas que incluye un proceso minero, con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares, generan problemas ambientales de alto impacto (SEMIP, 1994).

### Agroquímicos

El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Muchos de los plaguicidas empleados en el país hasta la fecha, se han prohibido en otros países por su toxicidad. Sin embargo, el número de plaguicidas se incrementa a razón de 10% al año. Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incremente en más de seis veces (CICLOPLAFEST, 2000).

### **La recuperación de suelos contaminados**

En los últimos años, muchas investigaciones han ido encaminadas a tratar de recuperar los suelos contaminados en vez de destruirlos. La destrucción de los suelos se realiza generalmente trasladándolos a vertederos adecuadamente aislados y controlados porque se intuye que otros tratamientos de recuperación no ofrecen las garantías suficientes para contener la contaminación. En la actualidad se dispone de un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, algunas de aplicación habitual y otras todavía en fase experimental, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos. Su aplicación depende de las características del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada con cada

tratamiento, de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo. Según la forma en la que se apliquen las técnicas de recuperación de suelos se habla de tratamientos *in situ*, que actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan, y tratamientos *ex situ*, que requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento, ya sea en el mismo lugar (tratamiento *on-site*) o en instalaciones externas que requieren el transporte del suelo contaminado (tratamiento *off-site*). Los tratamientos *in situ* requieren menos manejo pero por lo general son más lentos y más difíciles de llevar a la práctica dada la dificultad de poner en contacto íntimo a los agentes de descontaminación con toda la masa de suelo contaminada. Los tratamientos *ex situ* suelen ser más costosos, pero también más rápidos, consiguiendo normalmente una recuperación más completa de la zona afectada.

En función de los objetivos que se quieren alcanzar a la hora de recuperar un suelo contaminado, se puede distinguir entre: Técnicas de contención, que aíslan el contaminante en el suelo sin actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en el suelo. Técnicas de confinamiento, que reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración actuando directamente sobre las condiciones fisicoquímicas bajo las que se encuentran los contaminantes. Técnicas de descontaminación, dirigidas a disminuir la concentración de los contaminantes en el suelo (Kaifer *et al.*, 2004).

## Diesel

El Diesel Fuel es la fracción de petróleo que es destilada después del queroseno (202–306 °C). La composición contiene cadenas alifáticas saturadas y fracciones aromáticas de diez a diecinueve átomos de carbono (C conformadas por parafinas ciclo parafinas y grupos aromáticos. El diesel está compuesto esencialmente de n-alcanos (65-85 por ciento) cadenas lineales y ramificadas (parafinas), cicloalcanos, hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) 10 – 30 por ciento, azufre, entre otros. Algunos derivados del petróleo son usados en la industria y en el transporte (gasolina y diésel). 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 diésel 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 (Van Deuren *et al.*, 1997).

## **Técnicas de Remediación**

Tecnología de tratamiento implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001). Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente. Como ya se mencionó, el uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers, 1999).

## **Clasificación de Tecnologías de Remediación**

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: estrategia de remediación; lugar en que se realiza el proceso de remediación, y tipo de tratamiento. Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación (Van Deuren *et al.*, 1997; Sellers, 1999; EPA, 2001).

### **Estrategia de remediación**

Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

-Destrucción o modificación de los contaminantes. Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

- Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separa del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).
- Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

Realización del proceso de remediación

En general, se distinguen dos tipos de tecnología:

- *In situ*. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
- *Ex situ*. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (*on site*) o (*off site*).

Tipos de tratamientos:

Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

- Biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Físicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

## Tecnologías tradicionales

Son tecnologías utilizadas comúnmente a gran escala, cuya efectividad ha sido probada. La información disponible acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso. Entre las tres tecnologías tradicionales usadas con mayor frecuencia, se encuentran: la incineración *in situ* y *ex situ*, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

## Tecnologías innovadoras

Son tecnologías propuestas más recientemente, que pueden encontrarse en diferentes etapas de desarrollo (investigación, escala piloto o gran escala). Su limitado número de aplicaciones genera la falta de datos acerca de sus costos y eficiencias. En general, una tecnología de tratamiento se considera novedosa si su aplicación a gran escala ha sido limitada.

## **Lavado de suelos**

El lavado del suelo es una técnica que consiste en el uso de líquidos (generalmente agua, combinada a veces con aditivos químicos) y un procedimiento mecánico para depurar el suelo. Con este procedimiento se retiran contaminantes peligrosos y se los concentra, reduciendo su volumen. Los contaminantes peligrosos tienden a unirse en forma química o física al limo y la arcilla, materiales que, a su vez, se unen a la arena y a partículas de grava. En el procedimiento de lavado del suelo se separa la tierra fina contaminada (limo y arcilla) de la tierra gruesa (arena y grava). Una vez concluido el procedimiento, la tierra de volumen más reducido, que contiene la mayoría de las partículas finas de limo y arcilla, puede ser sometida a un tratamiento ulterior con otros métodos (como incineración o medidas biocorrectivas)

o se puede eliminar de conformidad con las normas federales y estatales. La tierra más limpia, de mayor volumen, no es tóxica y se puede usar como relleno. Durante el procedimiento, las partículas de grava y de arena más pesadas se asientan y son sometidas a pruebas para detectar contaminantes. Si están limpias, este material se puede usar en el sitio o llevarse a otro lugar para usarlo como relleno. Si todavía quedan vestigios de contaminantes, se puede someter el material a otro ciclo de lavado, recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o eliminarlo en otro lugar. Este último método podría estar reglamentado por la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos o la Ley de Control de Sustancias Tóxicas. El limo y la arcilla contaminados que están en el agua del lavado se asientan y se separan del agua del lavado. Como el agua del lavado ahora contiene contaminantes, es sometida a un tratamiento a fin de que se pueda reciclar para otros usos. Como ya se dijo, el agua de lavado podría contener aditivos, algunos de los cuales podrían interferir en el tratamiento. En ese caso, hay que retirar los aditivos o neutralizarlos con un tratamiento preliminar.

Después de separar el limo y la arcilla del agua del lavado, se los somete a una prueba para determinar si contienen contaminantes. Si todos los contaminantes pasaron al agua del lavado y el limo y la arcilla están limpios, el limo y la arcilla se pueden usar en el sitio o se pueden llevar a otro lugar para usarlos como relleno. Si el material todavía está contaminado, se puede someter a otro ciclo de lavado, recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o eliminarlo en un vertedero autorizado por la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos o la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (Reed *et al.*, 1996).

El lavado del suelo se puede usar por sí solo, pero a menudo se usa combinado con otras técnicas de tratamiento. El uso principal del lavado del suelo tal vez sea como técnica para reducir el volumen, concentrando los contaminantes en una masa relativamente pequeña de material. Cuanto mayor sea el porcentaje de arena gruesa y grava en el material que deba tratarse (que se puede limpiar y quizá

llevar de vuelta al sitio), más eficaz será el lavado del suelo en función del costo. Idealmente, el proceso de lavado del suelo reduciría el volumen en un 90% (lo cual significa que sólo el 10% del volumen original necesitaría tratamiento ulterior). Si los desechos tienen un alto porcentaje de limo fino y arcilla, una parte mayor del material deberá ser sometida a otro tratamiento subsiguiente más costoso. Estos suelos tal vez no sean buenos candidatos para un lavado. El lavado del suelo se usa para tratar una amplia gama de contaminantes, como metales, gasolina, fuel-oíl y plaguicidas. El uso de esta técnica presenta varias ventajas: Crea un sistema cerrado que no es afectado por condiciones externas. Este sistema permite controlar las condiciones como el pH y la temperatura) en las cuales se tratan las partículas del suelo. Permite excavar los desechos peligrosos y tratarlos *in situ*. Ofrece la posibilidad de retirar una gran variedad de contaminantes del suelo. Es eficaz en función del costo porque puede usarse como tratamiento preliminar, reduciendo considerablemente la cantidad de material que necesitaría tratamiento ulterior con otro método. Además, produce un material más uniforme al cual se aplicarán otras técnicas de tratamiento (EPA, 1996).

Con el lavado del suelo se obtiene un resultado óptimo cuando el suelo no contiene mucho limo o arcilla. En algunos casos, lo mejor es combinar el lavado del suelo con otras técnicas de tratamiento, en vez de usarlo por sí solo. A menudo se pueden retirar mejor los contaminantes durante el proceso de lavado del suelo añadiendo aditivos químicos al agua del lavado. Sin embargo, la presencia de estos aditivos podría dificultar el tratamiento del agua del lavado usada y la eliminación de residuos del lavado. Hay que tener en cuenta el costo de la manipulación y el uso de aditivos en función de la mejora que se logrará en la eficacia del proceso de lavado del suelo (EPA, 1996).

## Lavado *ex situ*

El lavado de suelos es un tratamiento generalmente *ex situ* en el que el suelo excavado es previamente separado físicamente por tamizado, densidad o gravedad para eliminar las partículas de grava más gruesas, con poca capacidad de adsorción, de la fracción fina y seguidamente lavado con extractantes químicos que permitan desorber y solubilizar los contaminantes. Después del tratamiento químico, el suelo se vuelve a lavar con agua para eliminar los contaminantes y agentes extractantes residuales y se devuelve a su lugar de origen. La eficacia de esta técnica depende del grado de adsorción del contaminante, controlado por una serie de propiedades del suelo como el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la mineralogía o el contenido en materia orgánica y otros factores como el tiempo que hace que el suelo está contaminado o la presencia de otros elementos tóxicos (Reed *et al.*, 1996) Figura 1.

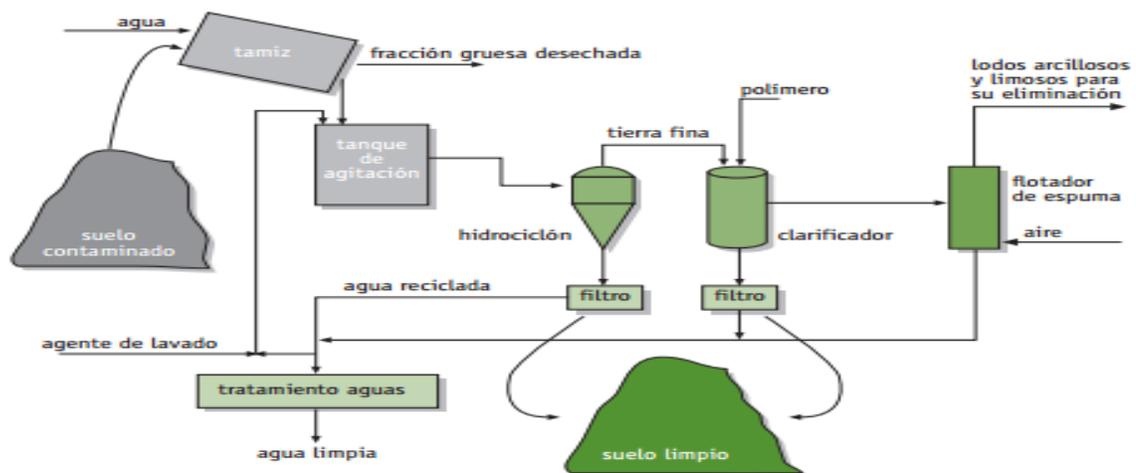


Figura 1. Proceso de lavado de suelo (Técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).

El lavado de suelos se utiliza fundamentalmente para suelos contaminados con compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo y

substancias inorgánicas como cianuros y metales pesados, y es menos eficaz para tratar compuestos orgánicos volátiles y pesticidas. Substancias extractantes utilizadas pueden ser ácidos, bases, agentes quelantes, alcoholes, surfactantes y otros aditivos como sales. Se ha visto que agentes quelantes como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el ácido cítrico y el ácido nitrilotriacético (NTA), y otros ácidos como el ácido clorhídrico son eficaces a la hora de eliminar Cu, Pb y Zn de suelos contaminados. Asimismo, los surfactantes (compuestos con una parte hidrofóbica y una parte hidrofílica de naturaleza catiónica, aniónica y biológica) son eficaces a la hora de separar los compuestos no acuosos de fase líquida del agua y compuestos derivados del petróleo (Hayes *et al.*, 1986; Falatko, 1991; Burd y Ward, 1996).

### **Lavado *In situ***

El lavado del suelo *in situ* es una técnica de tratamiento que consiste en hacer circular a través de los suelos contaminados una disolución que arrastre los contaminantes. El tipo de disolución de lavado que se necesita para el tratamiento depende de los contaminantes que se hallen en el suelo, pero generalmente es una de las siguientes: - Agua solamente, para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en el agua - Agua con ácidos, para extraer metales y contaminantes orgánicos, como los que se encuentran generalmente en el reciclaje de baterías o en procesos de cromado industrial. Por ejemplo, la contaminación con zinc, una de las posibles consecuencias de las operaciones de cromado, se trataría con una disolución ácida (Conde, 2002).

Agua con bases, para tratar fenoles y algunos metales. - Agua con agentes tensioactivos (detergentes), para retirar contaminantes oleosos. También se está investigando el uso de agua con disolventes orgánicos (por ejemplo, etanol) como disolución de lavado, para disolver ciertos contaminantes que el agua sola no puede disolver. En todo caso, si los aditivos utilizados plantean a su vez riesgos de contaminación, es necesario eliminarlos para conseguir una recuperación completa

El lavado de suelo in situ se realiza utilizando un sistema de rociadores o pozos de inyección de agua limpia, por encima de la zona contaminada, de forma que el agua se infiltra a través del suelo contaminado, lavándolo. La instalación debe incluir además un sistema de pozos de extracción del agua de lavado, con sus correspondientes bombes (Conde, 2002) Figura 2.

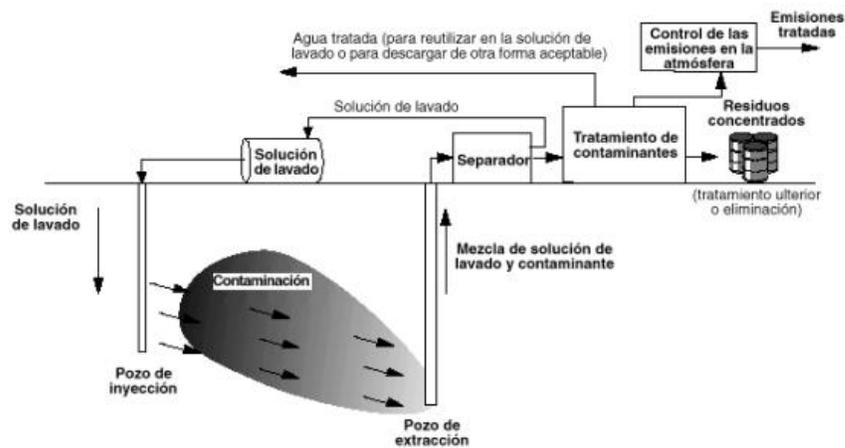


Figura 2. Lavado de Suelo In situ (Técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).

La cantidad, la ubicación y la profundidad de los pozos de inyección y de extracción dependen de varios factores geológicos y consideraciones técnicas. Los pozos pueden instalarse en forma vertical u horizontal. Además de la colocación de los pozos, hay que trasladar hasta el sitio otros equipos (como un sistema de tratamiento de aguas residuales) o construirlos *in situ*. La disolución de lavado se introduce en los pozos de inyección por bombeo y pasa por el suelo, arrastrando contaminantes mientras se dirige a los pozos de extracción. En los pozos de extracción se bombea la disolución de lavado mezclada con los contaminantes. Esta generalmente pasa a un sistema de tratamiento de aguas residuales, para eliminar los contaminantes, de forma que el agua tratada puede reutilizarse en la disolución de lavado o eliminarse de otra forma aceptable (Conde, 2002).

El lavado del suelo *in situ* puede aplicarse sólo al tratamiento de contaminantes que sean solubles en la disolución de lavado.

Con el lavado del suelo *in situ* se obtienen resultados óptimos en lugares donde el suelo permite el paso de la disolución de lavado. Si el suelo tiene un alto porcentaje de limo o arcilla, por ejemplo, la disolución de lavado no puede desplazarse fácilmente en su interior, de modo que no puede entrar en contacto fácilmente con los contaminantes. Eso limita la eficacia general del proceso de lavado del suelo.

En la selección de esta técnica influyen también los siguientes factores, entre otros:

- Se debe comprender bien el flujo del agua subterránea a fin de proyectar el sistema de pozos para un lugar determinado. Posiblemente se necesiten extensos estudios sobre el terreno para lograr un conocimiento acabado del flujo del agua subterránea.
- Es necesario comprender bien la composición y disposición de las capas subterráneas para prever el trayecto que seguirán el líquido de lavado y los contaminantes y cerciorarse de que los contaminantes no se extiendan fuera del lugar donde se pueden recoger.
- Como el lavado del suelo *in situ* se adapta al tratamiento de determinados contaminantes, no es muy eficaz para los suelos contaminados con una mezcla de sustancias peligrosas, como metales y aceites. Sería difícil preparar una disolución de lavado capaz de retirar eficazmente varios tipos diferentes de contaminantes al mismo tiempo (Conde, 2002).

### **Tecnologías de remediación utilizadas en México**

En el mercado ambiental de nuestro país, actualmente existen una gran cantidad de empresas que ofrece diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, no fue hasta 1997, que las autoridades ambientales establecieron un programa de verificación y certificación de estas

empresas. Actualmente para poder realizar un trabajo de remediación es necesario contar con permisos específicos, como la Licencia ambiental única (LAU). Esta disposición oficial, ha permitido un mayor control acerca de las tecnologías que se ofrecen para remediar suelos y de las posibilidades reales de éxito que estas permiten. De acuerdo con datos proporcionados por la SEMARNAT (2002), todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados, están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados con compuestos orgánicos. De un total de 57 empresas autorizadas, ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados con metales. Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los hidrocarburos (HTP, HAP), lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación. De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados con diferentes tipos de contaminantes, la mayoría utilizan métodos biológicos (biorremediación) para el tratamiento. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México Figura 3.

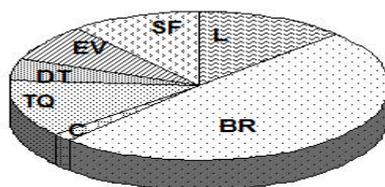


Figura 3. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México (SEMARNAT, 2002).

BR: biorremediación; L: lavado; SF: separación física; EV: extracción de vapores; DT: desorción térmica; TQ: tratamiento químico; C: centrifugación.

## Surfactantes

Desde 1980, ha habido más de 27 proyectos. Han tenido lugar en Alberta (Canadá), Catriel Oeste (Argentina), California, Louisiana, Oklahoma, Colorado y Wyoming (USA) y varias áreas de China, Venezuela e Indonesia. Otros 13 se adicionaron en Octubre de 2001 y en los últimos años se han iniciado varios otros con la participación de las principales empresas proveedoras de surfactantes y polímeros del mundo. La mayoría de los proyectos fueron ASP y usaron bajas concentraciones de surfactantes (0.1 % a 0.3%). Para producir surfactante adicional (por saponificación de los ácidos de petróleo) y reducir la adsorción del surfactante adicionado, estas tecnologías utilizan Álcali (carbonato o hidróxido de sodio). Los surfactantes son moléculas que tienen una fracción de cabeza polar hidrofílica y una cola hidrofóbica de fracción no polar (Deshpande y Shiau, 1999).

El uso potencial de los surfactantes para remediar suelos contaminados con hidrocarburos depende principalmente de las capacidades fisiológicas de los microorganismos, la estructura química del hidrocarburo y los factores ambientales del suelo. En un sistema la adición de surfactantes puede tener dos consecuencias: en primer lugar puede mejorar la dispersión y la pseudosolubilización como fue demostrado por Breuil y Kushner quienes señalan que los ácidos grasos C16 y C18 y los surfactantes Triton X-100, FI-70, 75 y Brij, estimulan el crecimiento de *Pseudomonas eruginosa* en hexadecano. En segundo lugar, la presencia de surfactante líquido-líquido puede inhibir la adhesión bacteriana a esa interfaz, reduciendo la tasa de degradación, esto se demostró por primera vez por Aiba para la degradación de n-dodecano y tetradecano en presencia de Tween 20 y para el n-hexadecano (Fernández *et al.*, 2004).

Estos compuestos también conocidos como agentes tensioactivos, son agentes de humectación que bajan la tensión superficial de un líquido, permiten una más fácil dispersión y bajan la tensión interracial entre dos líquidos.

## Etimología

La palabra surfactante proviene del término en inglés surfactant surface-active-agent agente de superficie o tensioactivo.

Los surfactantes son usualmente compuestos orgánicos amfifílicos, o que contienen grupos no polares hidrofobos o lipofílicos, solubles en hidrocarburo (colas) y grupos polares hidrofílicos (cabezas) solubles en agua. Por ello, son solubles en solventes orgánicos y en agua Figura 4.

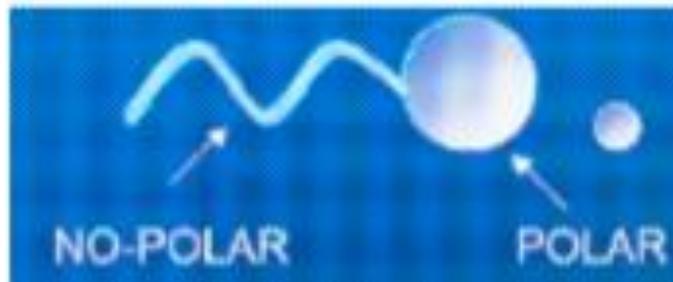


Figura 4. Esquema de cómo actúa el surfactante (Trombetta, 2007).

## Operación y efectos

Los surfactantes reducen la tensión superficial del agua adsorbiéndose a la interface líquido-gas.

Ellos también reducen la tensión interfacial entre el crudo y el agua por adsorción en la fase líquido- líquido.

Todas las aplicaciones y usos de los surfactantes provienen de dos propiedades fundamentales de estas sustancias:

- La capacidad de adsorberse a las interfaces

La adsorción: es un fenómeno espontáneo impulsado por la disminución de energía libre del surfactante al ubicarse en la interface y satisfacer total o parcialmente su doble afinidad polar - no polar.

- Su tendencia a asociarse para formar estructuras organizadas

Asociación: fenómeno impulsado por efectos hidrófobos cuando se añade más surfactante a una solución acuosa.

La micela

Las terminaciones lipofílicas de las moléculas de surfactante se disuelven en el crudo, mientras que las terminaciones hidrofílicas cargadas permanecen en el exterior, rodeando el resto de la micela hidrofóbica.

Muchos surfactantes pueden también ingresar a una solución como micelas. La concentración a la cual el surfactante comienza a formar micelas se conoce como concentración micelar crítica. Esta, puede detectarse mediante diferentes métodos, ya que diversas propiedades presentan en esta zona una discontinuidad en su variación. Los métodos más empleados se basan sobre la variación de la tensión superficial (todos los tipos de surfactante) y de la conductividad electrolítica de las soluciones (sólo surfactantes iónicos).

Cuando las micelas se forman en el agua, sus colas forman un núcleo que puede encapsular una gota de crudo. Cuando se forman en la fase orgánica, la micela se conoce como micela inversa. En este caso las cabezas forman el núcleo y las colas mantienen un contacto favorable con el crudo.

Solubilización

Las soluciones micelares poseen una propiedad muy importante, llamada capacidad de Solubilización. Pueden solubilizar sustancias apolares (aceites, hidrocarburos) o anfífilas (alcoholes). A partir de la concentración micelar crítica, la

solubilización aumenta considerablemente, ya que el hidrocarburo penetra dentro del corazón de las micelas. En ciertos casos la solubilización puede ser considerable y se observan sistemas llamados microemulsiones.

### Ventajas y desventajas de los surfactantes

#### Ventajas:

- Se le atribuye el aumento de solubilidad y biodisponibilidad.
- De fácil comercialización, distribución y a bajo costo.
- Mejora la degradación del hidrocarburo.
- Algunos son biodegradables.

#### Desventajas:

- Su toxicidad y los efectos de los intermedios (residuos) suelen ser más tóxicos que los compuestos originales.
- Degradación preferencial del surfactante, puede disminuir la degradación del contaminante, la degradación del surfactante reducirá el efecto de la biodisponibilidad (Fernández *et al.*, 2004).

### Clasificación de los surfactantes

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se clasifican según su aplicación. Sin embargo, se observa que muchos surfactantes son susceptibles de ser utilizados en aplicaciones diferentes, lo que provoca confusiones. Por tanto, se prefiere, clasificarlos de acuerdo a la estructura de su molécula, o más exactamente según la forma de disociación en el agua.

#### Los surfactantes aniónicos

Se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este tipo pertenecen los detergentes sintéticos como los alquil benceno sulfonatos, los jabones (sales de sodio de ácidos grasos), los agentes espumantes como el lauril sulfato, los humectantes del tipo sulfosuccinato, los dispersantes del tipo lignosulfonatos, entre otros. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo.

#### Los surfactantes no iónicos

Están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, éter o amida. Una alta proporción de estos surfactantes pueden tornarse relativamente hidrofílicos gracias a la presencia de una cadena poliéter del tipo polióxido de etileno. El grupo hidrófobo es generalmente un radical alquilo o alquil benceno y a veces una estructura de origen natural como un ácido graso, sobre todo cuando se requiere una baja toxicidad.

#### Los surfactantes catiónicos

Se disocian en solución acuosa en un catión orgánico anfífilo y un anión generalmente del tipo halogenuro. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina grasa o de amonio cuaternario. La fabricación de estos surfactantes es mucho más cara que la de los anteriores y es por esta razón que no se les utilizan salvo en caso de aplicación particular, como cuando se hace uso de sus propiedades bactericidas o de su facilidad de adsorción sobre sustratos biológicos o inertes que poseen una carga negativa. Esta última propiedad hace que sean excelentes agentes antiestáticos, hidrofobantes, así como

inhibidores de corrosión, y puedan ser utilizados tanto en productos industriales como para uso doméstico (Fernández *et al.*, 2004).

La elección del surfactante es esencial

Desde que cada proyecto de recuperación terciaria es independiente, único y las condiciones varían, es extremadamente importante diseñar y formular el agente tensioactivo adecuado con el objeto de optimizar el tratamiento. En los últimos tiempos han aparecido en el mercado nuevos agentes tensioactivos que permiten la implementación de técnicas SP y aun solo agente tensioactivo, con éxito con el consiguiente ahorro de inversión en equipos y productos.

Una baja tensión interfacial es esencial para la recuperación de petróleo. La tensión interfacial incide en lo que se llama el Numero Capilar. El numero capilar (Nc), es representado como una relación que se ha definido para describir la interdependencia entre las fuerzas viscosas y la tensión interfacial y la restricción al pasaje a través de un capilar Fórmula 1.

$$Nc = \frac{\text{Fuerzas viscosas}}{\text{Fuerzas iterfaciales}} = \frac{(\Delta P)}{(L) \sigma} \dots\dots\dots 1$$

Donde ( $\Delta P$ ) es la presión diferencial a través de una longitud dada (L) y  $\sigma$  es la tensión interfacial entre el petróleo y la fase acuosa.

Otra forma de describir las fuerzas viscosas es con la velocidad que tendrá un fluido a través de una garganta poral y la viscosidad del fluido. Lo que se llama avance frontal.

En la siguiente Figura 5, se presenta la que utiliza la velocidad a través del poro (velocidad Darcy) y la viscosidad del fluido a empujar para describir las fuerzas viscosas. Una baja tensión interfacial es esencial para la recuperación de petróleo.

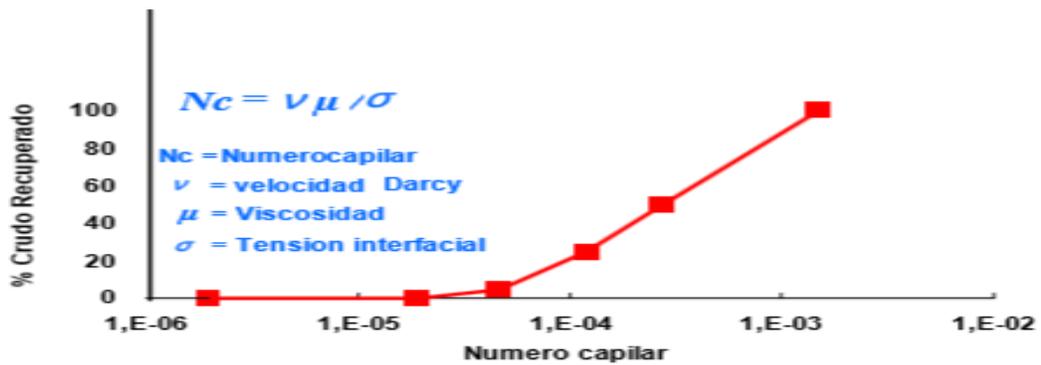


Figura 5. Relación entre número capilar y recuperación de crudo (Trombetta, 2007).

El número capilar típico después de la inyección de agua es  $10^{-6}$  y la recuperación de crudo cesa. La recuperación de crudo comenzará a crecer a medida que el número capilar suba (Trombetta, 2007).

Para poder recuperar cantidades significativas de crudo, el número capilar debe crecer 3 o 4 órdenes de magnitud. Si nos referimos a la ecuación de la Figura 5, el número capilar  $Nc$  es directamente proporcional al producto de la viscosidad y la velocidad  $v$  e inversamente proporcional a la tensión interfacial  $\sigma$ . Los valores de viscosidad y velocidad no pueden incrementarse por encima de un factor entre 2 y 10 sin causar daño a la formación; sin embargo la tensión interfacial entre el agua de formación y el crudo atrapado en la formación puede reducirse fácilmente en términos de 1000 a 10,000 veces por el agregado de tensioactivos especiales. Un número capilar típico es  $10^{-7}$ . Se necesita una reducción de 100 a 1000 veces de la tensión interfacial para mejorar la recuperación de petróleo por alteración del  $Nc$  a partir de la adición de agentes químicos al agua de inyección (Trombetta, 2007).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Características generales del área

El presente trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. El clima es seco templado con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 13.3°C, con una oscilación media de 10.4°C. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto con temperaturas máximas de 37°C. Durante enero y diciembre se registran temperaturas de hasta -10°C, con heladas regulares en el periodo de diciembre a febrero. Los vientos predominantes son del suroeste durante casi todo el año a excepción del invierno donde predominan del noroeste y se presentan con mayor intensidad los meses de febrero y marzo Figura 6.

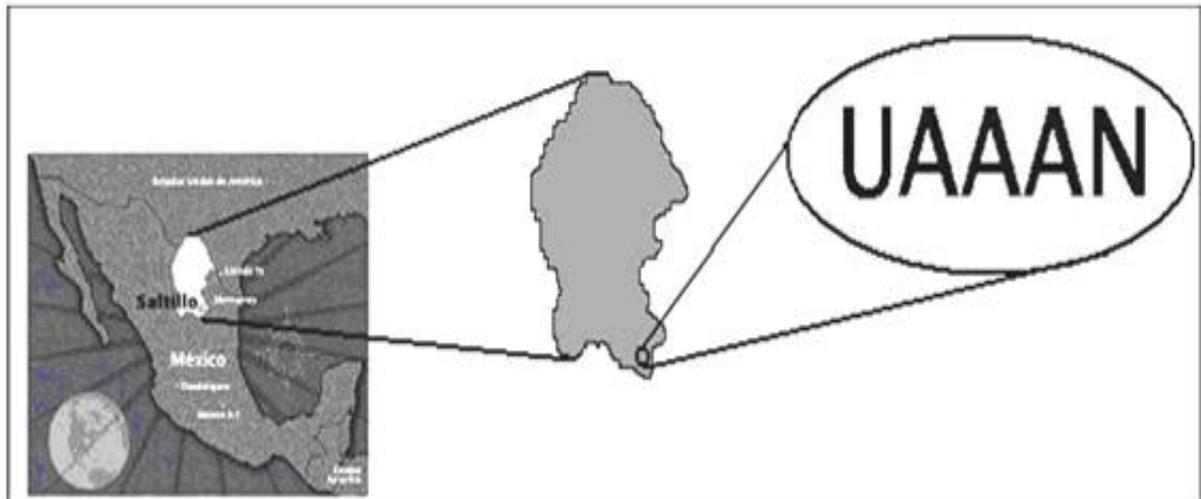


Figura 6 Ubicación del sitio experimental.

## METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente trabajo se tomaron 2 muestras de suelo, según la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. La primera el suelo 1 se obtuvo en el bajío de la UAAAN, y la segunda el suelo 2 al norte de la misma, se extrajo la muestra al azar a una profundidad de 50 cm, y se trasladó al departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN, donde se encuentra el laboratorio de química de suelos para realizar la caracterización física y química.

Para continuar con el procedimiento se secó y por consiguiente se cribó a 2 mm, donde se tomaron cinco kg de suelo y se contaminó artificialmente con diesel a una concentración de cien mil  $\text{mg kg}^{-1}$ , tomando como base los criterios de la NOM-038-SEMARNAT y de tal manera que el suelo contaminado sobrepasara por mucho el límite máximo permisible. Se intemperizó por un tiempo aproximado de tres meses. Cumpliendo con los requerimientos se procedió a la caracterización física y química como se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características físicas y químicas, métodos empleados para obtener los parámetros de los suelos.

| Características                     | Método                 |
|-------------------------------------|------------------------|
| Textura                             | Bouyoucos              |
| Potencial de hidrogeno relación 1;2 | Potenciómetro          |
| Conductividad Eléctrica             | Extracto de Saturación |
| Materia orgánica                    | Walkley y Black        |
| Materia orgánica                    | Calcinación            |
| Carbonatos                          | Acido Base             |

Nota: Estas características se realizaron a los 2 tipos de suelos, y posteriormente a los suelos contaminados.

## LAVADO DE SUELOS

Para la preparación de los surfactantes, se pesaron 15 g de jabón surfactante 1 anionico lineal y para el surfactante 2 anionico y no iónico se diluyo en 1500 ml de agua (1%). Posteriormente se homogenizó con el agitador magnético.

Teniendo las dos muestras, suelo 1 y suelo 2, los surfactantes preparardos surfactante 1 anionico lineal, surfactante 2 anionico y no iónico, se procedió a realizar los tratamientos de lavado siguiendo la metodología de lavado de acuerdo al trabajo de (Piña, 2006), quien recomienda una relación suelo surfactante para el lavado del suelo contaminado 1:3.

Tratamiento 1 consta de: 25 g de suelo 1, más 75 ml del surfactante 1.

Tratamiento 2 consta de: 25 g de suelo 1, más 75 ml del surfactante 2.

Tratamiento 3 consta de: 25 g de suelo 2, más 75 ml del surfactante 1.

Tratamiento 4 consta de: 25 g de suelo 2, más 75 ml del surfactante 2.

Ya que se organizaron los tratamientos, se procede a evaluar las variables de tiempo de agitación a cada uno de estos: 24, 48, 72, 96 y 120 h.

Al haberse realizado el lavado de suelo, se procede a la caracterización del carbono orgánico de los suelos para comparar y analizar los datos. El experimento fue establecido bajo un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los datos fueron analizados utilizando el programa R versión 3.1.1(R Core Team, 2014). Se realizó el análisis de varianza (ANVA) para tratamientos y la comparación múltiple de medias con el método de tukey ( $p=0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se tienen los valores de los suelos utilizados en este experimento, en el cual se determinaron sus características físicas y químicas, para posteriormente poder realizar las comparaciones con el mismo suelo contaminado con hidrocarburos.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos utilizados en este experimento.

|        | pH  | CE                 | MO WB | Carbonatos | HTP'S              | MO calcinación | Textura                   |
|--------|-----|--------------------|-------|------------|--------------------|----------------|---------------------------|
|        |     | dS m <sup>-1</sup> | %     | %          | Mgkg <sup>-1</sup> | %              |                           |
| Suelo1 | 7.9 | .45                | 0.57  | 11.6       |                    | 6.77           | Migajón arcilloso         |
| S1/C   | 8.2 | .45                | 6.65  | 11.9       | 89700              | 16.72          |                           |
| Suelo2 | 7.7 | .80                | 6.42  | 16.9       |                    | 11.22          | Migajón arcilloso arenoso |
| S2/C   | 7.9 | .70                | 13.15 | 21.0       | 90500              | 23.79          |                           |

Los datos obtenidos en el laboratorio indican que el porcentaje de materia orgánica tienen un aumento muy notorio, 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. Podemos mencionar que en general los valores de materia orgánica (carbono orgánico) son muy elevados lo que indica que el método está detectando además de carbono del suelo y del diesel, un carbono de los surfactantes (Piña, 2006).

## ANÁLISIS DE VARIANZA

Al evaluar el comportamiento promedio de diesel en cuatro tratamientos (dos tipos de suelo y dos surfactantes) en cinco tiempos, 24, 48, 72, 96, 120 h, con el método de Walkley y Black, el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de media llevado a cabo con el método de tukey ( $\alpha=0.05$ ) los tratamientos, T1, T2, y T4 ( $\text{mgkg}^{-1}$ ) mostraron diferencias significativas ( $p<0.05$ ) con respecto al T3. En el cuadro 3, se observa que el T3 en los cinco tiempos no mostró diferencias significativas. Sin embargo, numéricamente se observan diferencias siendo los mejores tiempos de extracción de diesel, 24 y 48 h. Además, se muestra que el T3 aventajo la extracción de diesel durante cinco tiempos respecto de los restantes tratamientos estudiados.

En general, para el Cuadro 3 se observa que para el T3 se tienen los valores más bajos mostrando mejor efectividad en comparación de los demás tratamientos. En el suelo dos e independientemente del surfactante los valores obtenidos son mucho más altos. El método de WB es un método que cuantifica el carbono fácilmente oxidable del suelo, en este caso tenemos el carbono del suelo más el del diesel, el cual de acuerdo a la bibliografía este material tiene un 75 % de carbono fácilmente oxidable, por otro lado este análisis se realizó una vez que el suelo fue lavado con los surfactantes, cuyo objetivo es eliminar el diesel del suelo, por los resultados obtenidos podemos mencionar que en general los valores de materia orgánica (carbono orgánico) son muy elevados lo que indica que el método está detectando además de carbono del suelo y del diesel, un carbono que posiblemente proviene de los surfactantes.

Cuadro 3. Comportamiento promedio de diesel ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) evaluado en cuatro tratamientos (dos tipos de suelos y dos surfactantes) y en cinco tiempos, utilizando el método de WB.

| Tratamientos | Tiempo (horas)           |                |                |                |                |
|--------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|              | 24                       | 48             | 72             | 96             | 120            |
| T1           | 122149 ab                | 117413 ab      | 149644 b       | 288853 c       | 212133 c       |
| T2           | 155708 b                 | 174023 bc      | 168300 c       | 161432 b       | 148940 b       |
| <b>T3</b>    | <b>51500 a</b>           | <b>51544 a</b> | <b>65280 a</b> | <b>70988 a</b> | <b>67569 a</b> |
| T4           | 135977 b                 | 170000 bc      | 82189 ab       | 78993 ab       | 75797 ab       |
| Cv (%)       | 25.68                    | 15.98          | 12.27          | 23.5           | 44.72          |
| Prueba       | Tukey( $\alpha = 0.05$ ) |                |                |                |                |

Al evaluar el comportamiento promedio de diesel en cuatro tratamientos (dos tipos de suelo y dos surfactantes) en cinco tiempos, 24, 48, 72, 96, 120 h, con el método de calcinación, el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de media llevado a cabo con el método de tukey ( $\alpha=0.05$ ) los tratamientos, T1, T2, y T3 ( $\text{mgkg}^{-1}$ ) mostraron diferencias significativas ( $p<0.05$ ). En el cuadro 4, se observa que el T4 en tres tiempos de evaluación (24, 48 y 96) no mostró diferencias significativas y para los tiempos 72 y 120 fue estadísticamente similar. Sin embargo, numéricamente se observan diferencias siendo los mejores tiempos de extracción de diesel, 24 y 96 h. Además, se muestra que el T4 aventajo la extracción de diesel durante cinco tiempos respecto de los restantes tratamientos estudiados. Sin embargo, cabe señalar que el T3 mostró mayor extracción de diesel a las 120 h de evaluación.

En el Cuadro 4, el método de calcinación es un método donde implica la destrucción climatizada de toda la materia orgánica del suelo, el contenido de materia orgánica se calcula como la diferencia del peso inicial del crisol, cabe mencionar que la humedad o agua pueden alterar los resultados, además de los carbonos presentes en los surfactantes. Lo cual puede referirse a la alteración de los resultados de materia orgánica por este método (Piña, 2006).

Cuadro 4. Comportamiento promedio de diesel ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) evaluado en cuatro tratamientos (dos tipos de suelos y dos surfactantes) y en cinco tiempos, utilizando el método de calcinación.

| Tratamientos | Tiempo (h)               |                 |                  |                |                  |
|--------------|--------------------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
|              | 24                       | 48              | 72               | 96             | 120              |
| T1           | 219633 c                 | 197700 bc       | 219233 c         | 230823 c       | 182300 bc        |
| T2           | 181266 bc                | 198866 bc       | 242033 c         | 291566 c       | 214000 c         |
| T3           | 150000 ab                | 111766 ab       | 132366 b         | 175633 bc      | <b>94700 a</b>   |
| T4           | <b>80800 a</b>           | <b>105166 a</b> | <b>118333 ab</b> | <b>99166 a</b> | <b>118000 ab</b> |
| C.V (%)      | 18.65                    | 21.41           | 30.58            | 40.46          | 28.34            |
| Prueba       | Tukey( $\alpha = 0.05$ ) |                 |                  |                |                  |

Para el Cuadro 5, evaluar el comportamiento promedio de diesel en cuatro tratamientos (dos tipos de suelo y dos surfactantes) en cinco tiempos, 24, 48, 72, 96, 120 h, con el método de extracción con solventes, el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de media llevado a cabo con el método de tukey ( $\alpha=0.05$ ) los tratamientos, T1, T3, y T4 ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) mostraron diferencias significativas ( $p<0.05$ ) con respecto al T2. En el Cuadro 5, se observa que el T2 en los cinco tiempos no mostró diferencias

significativas. Sin embargo, numéricamente se observan diferencias siendo el mejor tiempo de extracción de diesel a 24 h.

Cuadro 5. Comportamiento promedio de diesel ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) evaluado en cuatro tratamientos (dos tipos de suelos y dos surfactantes) y en cinco tiempos, utilizando el método e HTP'S.

| Tratamientos | Tiempo (h)               |         |         |         |         |
|--------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
|              | 24                       | 48      | 72      | 96      | 120     |
| T1           | <b>19400 a</b>           | 30800 b | 25433 b | 31933 b | 31266 b |
| T2           | 33833 b                  | 54400 b | 26711 b | 45066 b | 55333 b |
| T3           | 21233 b                  | 20666 b | 45666 b | 34266 b | 30166 b |
| T4           | 22275 b                  | 50900 b | 26350 b | 41800 b | 32400 b |
| C.V (%)      | 21.94                    | 37.76   | 28.28   | 18.57   | 51.13   |
| Prueba       | Tukey( $\alpha = 0.05$ ) |         |         |         |         |

En donde no existe diferencia significativa como en el caso de Tratamiento 2 donde se obtuvieron los valores más bajos del lavado, como ya se mencionó anteriormente se toma la lectura de los valores menores como referencia de una mejor eficiencia de lavado por los surfactantes ya que se está evaluando la cantidad de diesel residual presente en el suelo, por lo tanto esto quiere decir que hubo mejor lavado en una forma muy general en los tratamientos y sobre todo a un tiempo de 24 horas.

En la Figura 7, se representa gráficamente para el método de HTP'S los valores y la extracción de diesel más significativo en cada tratamiento y tiempo establecido. Cabe mencionar que entre más bajo el valor de  $\text{mg.kg}^{-1}$  representado, la eficiencia de lavado fue mejor ya que lo que se representa es el diesel residual y entre más bajo el valor encontrado mayor diesel eliminado, en general la mejor extracción fue a las 24 h, donde se encontró menor cantidad de diesel, el surfactante uno independientemente del suelo, lo cual se ve en el T1 y T3 los resultados son más significativos y para el caso del surfactante 2 este tiene un comportamiento más inestable.

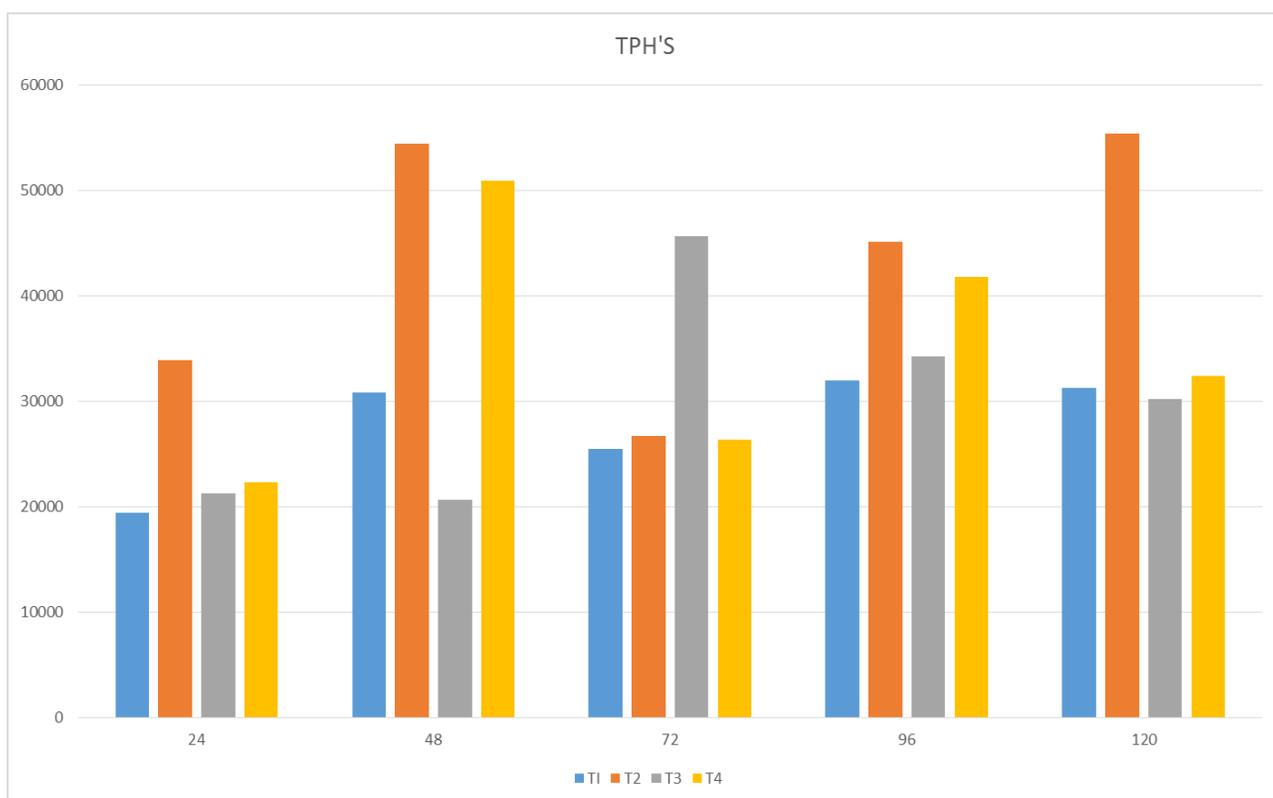


Figura 7. Tratamientos utilizados en la extracción de diesel con acetona, con 5 tiempos.

## CONCLUSIONES

En el proyecto de investigación “Lavado de suelos contaminados con diesel utilizando surfactantes”, el surfactante que tuvo más efectividad fue el anionico lineal, el cual se demuestra que el método por extracción con acetona, tiene una mayor eficiencia de extracción del diesel residual en los suelos, por lo tanto, éste método es el único que se recomienda para monitorizar en laboratorio para trabajos de lavado de suelos contaminados con diesel.

De acuerdo a los resultados no es necesario someter los suelos contaminados con diesel a tiempos mayores de 24 horas de lavado.

## LITERATURA CITADA

- Cancino, Á. M. 2001. La regulación de la remediación de suelos contaminados en México. SEMARNAT. Publicado por Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. México, D. F. 55 p.
- CICOPLAFEST. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural
- Conde, Gabriel. 2011. Contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Apuntes de gestión ambiental. 24 p.
- Córtés, L. A. L. 2011. Evaluación del efecto de un nuevo biosurfactante en el proceso de remoción de diésel en suelo. Tesis de maestría en ingeniería ambiental (UNAM). México, D. F. 109 p.
- EPA. 1996. Guía del ciudadano: el lavado del suelo. Ficha Tecnológica, oficina de innovaciones. EPA-542-F-96-018. 4. Estados Unidos. 4 p.
- Fernández, A. 2004. Surfactantes. Cuaderno FIRP S303-PP. Universidad de los Andes. México-Venezuela. 27 p.
- Kreiner, I. 2002. Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos. En: Cortinas, C. y C. Mosler (eds.). Gestión de residuos peligrosos. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- López, de M. J. B., 2006. Bioremediación de suelos contaminados con Hidrocarburos derivados del petróleo. NOVA-Publicación científica, vol. 4 núm. 5. ISSN: 1794-2470. pp. 82-90.
- Luters, A., y J. C. Salazar. 2000. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Traducción al español, CRN-CNIA-INTA. Argentina. 82 p.
- Martínez, V. E., y L. F. S. López. 2001. Efectos de hidrocarburos de las propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso. Terra Latinoamericana, vol. 19, núm.1. Sociedad de la Ciencia del Suelo, A. C. México. pp. 9-17.
- Méndez, M. Determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) usando CG-FID en suelo de un patio de tanques en desuso situado en Catia la Mar Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería, vol. 32, núm. 1. Venezuela. Pp. 31-38.

- Muñoz, C.S. 2010. Hidrología superficial. Universidad Autónoma Agraria Antonio, departamento de riego y drenaje, Narro. Apuntes de curso. Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México. 130 p.
- Norman, C. y J. C. Trombetta. 2007. El uso de surfactantes en proyectos de recuperación terciaria. Nota técnica, Tiorco. Estados Unidos. 5 p.
- Norma Oficial Mexicana (NOM)-138-Semarnat-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. México, D. F. 21 p.
- Olivera, V. L. E., y A. Rodríguez C. 2012. Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolinas y diesel en México. ESIME-IPN, vol. 16, núm. 4. Instituto Politécnico nacional. México. Pp. 182-189.
- Ortíz, I. B. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá dirección de investigación de universidades e investigación. España. 108 p.
- Piña, O. 2012. Lavado in situ de un suelo contaminado con diesel, asistido por surfactantes. Tesis de Maestría para obtener el grado de MC. en ingeniería civil. Instituto Politécnico Nacional. México. 112 p.
- Quadri, G. 1994. Industria y política ambiental. El Nacional, sábado 18 de junio, México.
- Riojas, G. H. H. 2010. Efectos de los surfactantes en la bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Revista química viva, vol. 9, núm. 3. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 120-145 pp.
- Rodríguez, Z. J. 2014. Uso de solventes orgánicos en la extracción de diésel de un suelo contaminado. Tesis de licenciatura en Ingeniero agrícola ambiental. Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México. 39 p.
- Ruíz, U. S. 2003. Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos. Proyecto de desarrollo institucional y gestión de sitios contaminados. SEMARNAT. México D.F. 16 p.
- Salaguer, J-L. 2002. Surfactantes tipos y usos. Cuaderno FIRP S300-A. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela. 53 p.

Sepúlveda, V. y T. J. A.Velasco 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México, D. F. 62 p.

Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers. 326 pp.

[Http: //www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx). Septiembre de 2015.

[Http://www.gwrtac.org](http://www.gwrtac.org). Septiembre de 2015.

[Http://www.epa.gov/tio/remed.htm](http://www.epa.gov/tio/remed.htm). Septiembre de 2015.