



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIOS DE MEZCLADO EN EL PROCESO DE  
LAVADO DE SUELOS CONTAMINADOS CON  
HIDROCARBUROS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA QUÍMICA**

P R E S E N T A :

**MARIANA CLIMÉNT PALMER**



**MÉXICO, D.F.**

**2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente	Joaquin Palacios Alquisira
Vocal	Rodolfo Torres Barrera
Secretario	Luís G. Torres Bustillos
1er Suplente	Maria Guadalupe Lemus Barajas
2do Suplente	Alfonso Duran Moreno

Universidad Nacional Autónoma de México.  
Instituto de Ingeniería.  
Coordinación de Ingeniería Ambiental.

---

Asesor  
Luís Gilberto Torres Bustillos

---

Sustentante  
Mariana Climént Palmer

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi PAPA y a mi MAMA, porque sin ellos, sin su apoyo y sin sus sacrificios, no hubiera podido llegar hasta este momento. GRACIAS.

A mis hermanos que siempre están conmigo en las buenas y en las malas.

A mis amigas de la prepa, Jesica, Alexandra, Mónica y Jany, por su amistad incondicional y por todo el apoyo y cariño que siempre me han dado.

A Hiro, por ayudarme a tener más seguridad y confianza en mi misma, gracias por hacerme sentir que soy capaz de lograr lo que me proponga. Por todo tu apoyo, tu comprensión y tu cariño, por estar a mi lado, muchas gracias Hirokaz.

A todos mis amigos de la facultad por hacer de la universidad una etapa muy especial de mi vida.

A Diana, Gustavo, Dulce y Jennifer porque sin ellos no hubiera disfrutado de la misma manera mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A mi asesor de tesis, el Dr. Luís Torres, por su enseñanza, por el tiempo que me dedicó y por la paciencia que me tuvo durante todo este proceso de la elaboración de mi tesis, muchas gracias.

Al proyecto NSF-2004-CO1-2 de CONACYT, por todo el apoyo que le brindó a este trabajo y por la beca de tesis de licenciatura que me proporcionó.

A mi universidad, la UNAM por darme la oportunidad de estudiar y hacer crecer mi persona y muy especialmente a la Facultad de Química y a los profesores que contribuyeron en mi desarrollo.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. El suelo	3
2.2. La contaminación de suelos con hidrocarburos	5
2.3. La contaminación del suelo del campo petrolero Cinco Presidentes.	7
2.4. Normatividad	9
2.5. Tecnologías de remediación de suelos	11
2.6. Lavado de suelos	15
2.6.1. El proceso de lavado de suelos	15
2.6.2. Surfactantes	19
2.7. Mezclado	24
2.7.1. Generalidades	24
2.7.2. Suspensión de Sólidos	28
2.7.3. Números adimensionales en el Mezclado	29
3. OBJETIVOS	31
3.1. Objetivo General	31
3.2. Objetivos Específicos	31
4. HIPÓTESIS	32
5. MATERIALES Y MÉTODOS	33
5.1. Materiales	34
5.2. Sustancias	34
5.3. Equipos y Aparatos	35
5.4. Metodología Experimental	35
5.4.1. Preparación del suelo	35

---

5.4.2.	Caracterización del suelo	36
5.4.3.	Elección del Surfactante	41
5.4.4.	Pruebas de Lavado	42
5.4.4.1.	Determinación del error experimental	46
5.4.4.2.	Efecto de las variables en el porcentaje de remoción de hidrocarburos	47
5.4.4.3.	Efecto de las variables en el consumo de potencia	47
5.4.4.4.	Cinética de Lavado	48
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>51</b>
6.1.	Características del suelo de Tabasco	51
6.2.	Elección del surfactante	58
6.3.	Cinética del lavado de suelo	62
6.4.	Repetibilidad de la medición de la remoción de hidrocarburos	66
6.5.	Determinación de la velocidad mínima de suspensión de sólidos	67
6.6.	Efecto de los deflectores en el proceso de lavado	69
6.7.	Efecto del tipo de impulsor y la velocidad de agitación en la remoción de hidrocarburos	69
6.8.	Repetibilidad de las mediciones del consumo de potencia	72
6.9.	Efecto del tipo de impulsor y la velocidad de agitación en la potencia consumida	73
6.10.	Elección del impulsor y de la velocidad de agitación	77
6.11.	Caracterización del agua residual	82
<b>7. CONCLUSIONES</b>		<b>86</b>
<b>8. APÉNDICE</b>		<b>88</b>
<b>9. REFERENCIAS</b>		<b>93</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999 (PROFEPA, 2002).</i>	6
<i>Figura 2.2. Estado de Tabasco. Ubicación de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo y del campo petrolero Cinco Presidentes.</i>	7
<i>Figura 2.3. Pozos petroleros terrestres y lacustres del campo petrolero Cinco Presidentes en el municipio de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco</i>	9
<i>Figura 2.4. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México por empresas autorizadas (Fuente: SEMARNAT, 2002).</i>	14
<i>Figura 2.5. Esquema general del proceso de lavado ex situ y extracción química (Iturbe et al., 1998)</i>	17
<i>Figura 2.6. Estructura del Tanque de Lavado</i>	27
<i>Figura 2.7. Número de potencia contra el número de Reynolds (Ruston et al, 1950)</i>	30
<i>Figura 5.1. Metodología Experimental</i>	33
<i>Figura 5.2. Batería de separación No. 3 del campo petrolero Cinco Presidentes en el municipio de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco.</i>	36
<i>Figura 5.3. Tanque de lavado</i>	45
<i>Figura 6.1. Distribución del tamaño de las partículas en el suelo</i>	52
<i>Figura 6.2. Curva de distribución de suelo contaminado con hidrocarburos</i>	52
<i>Figura 6.3. Tipos de Suelos Presentes</i>	53
<i>Figura 6.4. Concentración de HTPs en las distintas fracciones de suelo.</i>	58
<i>Figura 6.5. Resultados de las pruebas de lavado con un solo surfactante</i>	60
<i>Figura 6.6. Resultados de las pruebas de lavado con surfactante y sal o mezclas de surfactantes.</i>	61
<i>Figura 6.7. Cinéticas del proceso de lavado de suelos.</i>	62
<i>Figura 6.8. Cinéticas de Lavado</i>	64

---

<i>Figura 6.9. Remoción de TPHs en función de la velocidad de agitación.</i>	70
<i>Figura 6.10. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor Rushton</i>	74
<i>Figura 6.11. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor de tres paletas planas.</i>	74
<i>Figura 6.12. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor de cuatro paletas inclinadas.</i>	75
<i>Figura 6.13. Energía consumida por el proceso de lavado en función de la velocidad de agitación</i>	76
<i>Figura 6.14. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor Rushton.</i>	78
<i>Figura 6.15. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor de tres paletas planas.</i>	78
<i>Figura 6.16. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor de cuatro paletas inclinadas</i>	79
<i>Figura 6.17. Remoción alcanzada en función de la energía consumida.</i>	81



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.</i>	11
<i>Tabla 2.2. Técnicas In Situ de Limpieza de suelos. (Fuente: Rivera Cruz, 2004).</i>	12
<i>Tabla 2.3. Técnicas Ex Situ de Limpieza de suelos. (Fuente: Rivera Cruz, 2004).</i>	13
<i>Tabla 2.4. Concentraciones Micelares Críticas para diferentes surfactantes</i>	20
<i>Tabla 5.1. Surfactantes utilizados</i>	41
<i>Tabla 5.2. Impulsores utilizados en el presente trabajo.</i>	43
<i>Tabla 6.1 Clasificación de los tamaños de partícula del suelo</i>	52
<i>Tabla 6.2 Clase de suelo según el contenido de arena, limo y arcilla. (Mirsal, 2004)</i>	53
<i>Tabla 6.3. Características fisicoquímicas del suelo</i>	54
<i>Tabla 6.4. Contenido de Calcio, Potasio, Sodio y Magnesio en el suelo</i>	55
<i>Tabla 6.5. Características del suelo de tabasco y de un suelo dedicado al cultivo.</i>	56
<i>Tabla 6.6. Metales Presentes en las diferentes Mallas del Suelo de Tabasco</i>	57
<i>Tabla 6.7. Características de los surfactantes utilizados</i>	59
<i>Tabla 6.8. Media y desviación estandar de las pruebas de lavado</i>	66
<i>Tabla 6.9. Error porcentual de las pruebas de lavado.</i>	66
<i>Tabla 6.10. Valores para la ecuación de Armenante</i>	67
<i>Tabla 6.11. Velocidad mínima para la suspensión total de sólidos teórica y experimental</i>	68
<i>Tabla 6.12. Cambio en la remoción al modificar la velocidad de agitación.</i>	71
<i>Tabla 6.13. Duplicado de las pruebas de consumo de potencia en la agitación de agua.</i>	72

---

<i>Tabla 6.14. Características del agua residual.</i>	71
<i>Tabla 6.15 Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales. NOM-002-ECOL-1996.</i>	82
<i>Tabla 6.16. Límites máximos permisibles en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. NOM-003-ECOL-1997</i>	83
<i>Tabla 6.17. Límites máximos permisibles de constituyentes químicos para el agua de consumo humano. NOM-127-SSA1-1994</i>	84
<i>Tabla 6.18. Calidad del agua residual generada y la requerida por las normas oficiales mexicanas.</i>	84
<i>Tabla 9.1. Distribución del tamaño de las partículas en el suelo</i>	88
<i>Tabla 9.2. Concentración de HTPs en las distintas fracciones de suelo.</i>	88
<i>Tabla 9.3. Resultados de las pruebas de lavado con un solo surfactante</i>	89
<i>Tabla 9.4. Resultados de las pruebas de lavado con surfactante y sal o mezclas de surfactantes.</i>	89
<i>Tabla 9.5. Cinéticas del proceso de lavado de suelos.</i>	90
<i>Tabla 9.6. Remoción de TPHs para diferentes velocidades de agitación.</i>	90
<i>Tabla 9.7. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor Rushton a diferentes velocidades.</i>	91
<i>Tabla 9.8. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor de tres paletas planas a diferentes velocidades.</i>	91
<i>Tabla 9.9. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor de cuatro paletas inclinadas a diferentes velocidades.</i>	92
<i>Tabla 9.10. Energía total consumida, potencia consumida y remociones alcanzadas por los tres impulsores a distintas velocidades de agitación.</i>	92

## **1. INTRODUCCIÓN**

En México, sobretodo por las diversas actividades que realiza la industria petrolera, existen extensas áreas de suelos contaminadas con hidrocarburos (HTPs), por lo cual hoy en día una de las mayores preocupaciones de las autoridades ambientales es encontrar y/o desarrollar tecnologías que permitan la eliminación de estos contaminantes.

En la actualidad, entre las diversas técnicas que nos permiten llevar a cabo esta remediación tan necesaria, se encuentra el lavado de suelo con surfactantes, el cual resulta muy útil cuando se requiere una remediación rápida o cuando la contaminación es tan alta que no permite la supervivencia de los microorganismos necesarios en los métodos biológicos.

Se trata de una técnica ex situ, ya que el suelo tiene que ser excavado y trasladado para llevar a cabo la restauración, y fisicoquímica porque consiste en poner en contacto, por medio de la agitación, las partículas de suelo con una solución de lavado, para así lograr la remoción de los contaminantes.

Debido a la naturaleza de la operación se requiere que todas las partículas se encuentren suspendidas y que tengan el mayor contacto posible con la solución de surfactante por lo que el mezclado resulta un factor de gran importancia para que el lavado se lleve a cabo con éxito.

Actualmente existe el problema de que las operaciones de mezclado son en ocasiones llevadas a cabo en un nivel muy grande de empirismo. Esta situación, se debe en parte a que los ingenieros ambientales no están suficientemente capacitados en los fundamentos de las operaciones de mezclado como para que les permita, al menos seleccionar adecuadamente un tipo de impulsor para una determinada aplicación.

Adicionalmente, el mezclado es una de las operaciones unitarias en Ingeniería Química más difíciles de someter a un análisis científico ya que depende de una gran cantidad de variables como lo son la forma del recipiente, el tipo del impulsor, la altura a la que se encuentra del impulsor, el tiempo de mezclado, la velocidad de agitación, la presencia de deflectores, entre otras. Hasta el presente no se han desarrollado códigos de diseños de equipos de mezclado que sean ampliamente aceptados y mucha de la investigación que se ha realizado al respecto no es con sistemas reales, sino con modelos.

Estos estudios muchas veces resultan difíciles de aplicar al lavado de suelos, ya que generalmente utilizan partículas uniformes y a veces hasta del mismo tamaño y el suelo tiene la particularidad de que tiene una enorme gama de tamaños de partículas diferentes. Además conforme se lleva a cabo el proceso se va dando el fenómeno de que tanto la composición del sólido como del líquido cambia ya que el hidrocarburo se desprende del suelo al ser atrapado por el surfactante en micelas y se disuelve en el líquido.

Es por esto que resulta tan importante realizar estudios del proceso mezclado donde se analice el efecto de las diferentes variables involucradas para la aplicación del lavado de suelos con el propósito de lograr operaciones más eficientes, es decir que consuman la menor energía posible y remuevan la mayor cantidad posible de contaminante en un menor tiempo.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. El suelo

El suelo es la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.

Desempeña diversas funciones, como la de medio filtrante durante la recarga de los mantos acuíferos y la protección de los mismos, también es el lugar donde ocurren los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y ser el soporte de la vegetación. (Saval, 1995)

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. (Contreras, 2007).

Hablando de manera muy general, el suelo es un sistema de tres dimensiones, compuesto por una fase sólida, una líquida y una gaseosa (Mirsal, 2004):

Fase Sólida	Minerales	45%
	Materia Orgánica	5%
Fase Líquida	Agua	25%
Fase Gaseosa	Aire y gases	25%

Dentro de estas tres fases encontramos cuatro tipos de componentes principales:

**Compuestos inorgánicos**, como: grava, arcilla, limo y arena.

**Nutrientes solubles**, importantes para las plantas: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

**Materia orgánica de organismos muertos**, como: lombrices, hongos, bacterias y restos de plantas en cualquier proceso de descomposición.

**Agua y gases**, por ejemplo hidrógeno y oxígeno, que ocupan los espacios porosos libres.

Las proporciones de cada uno de ellos son variables: en zonas de clima templado-húmedo, la materia orgánica representa entre 2 y 5 por ciento; en cambio, en el desierto puede ser menor de 1 por ciento. En climas secos, por lo general, los suelos son más arenosos y con mayor presencia de calcio y sodio; por el contrario, en los húmedos tienden a ser más arcillosos en general y con mayor concentración de elementos ácidos, como fierro y aluminio.

Los compuestos minerales en el suelo dependen en gran manera de la naturaleza y composición de la roca madre. Sin embargo como  $\frac{3}{4}$  partes de la roca esta compuesta de silicio y oxígeno, encontramos que los silicatos ocupan una posición central en la descripción de los constituyentes minerales de cualquier suelo. Todos los silicatos se forman a partir de una unidad estructural fundamental en forma de tetraedro, compuesta de un ión de silicio ( $\text{Si}^{+4}$ ) y cuatro de oxígeno ( $\text{O}^{-2}$ ). (Mirsal, 2004)

A partir de esta unidad estructural fundamentalse forman diversos tipos de silicatos, que se pueden categorizar en los siguientes grupos:

- Ortosilicatos
- Silicatos en cadena (Inosilicatos)
- Silicátos en hojas (Filosilicatos)

## **2.2. Contaminación de Suelos con Hidrocarburos**

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, pero muy difíciles de cuantificar, 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 (SEMARNAT, 2002).

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 km<sup>2</sup>.

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. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros (Figura 2.1).

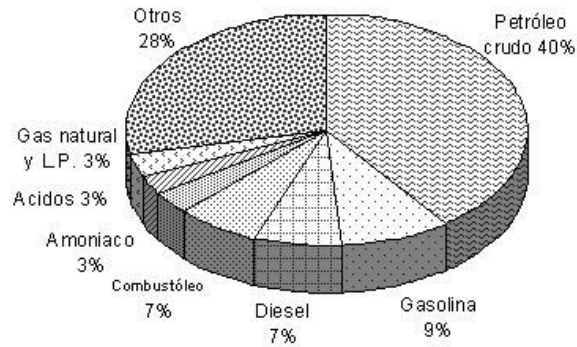


Figura 2.1. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999 (PROFEPA, 2002).

Así, observamos que en el 63% de las emergencias ambientales está involucrado el petróleo y sus derivados. A pesar de que la contaminación de suelos por hidrocarburos se ha producido desde muchos años atrás, hasta hace poco a nadie le preocupaba el destino de estos compuestos, dando por hecho que la naturaleza limpiaba el ambiente.

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).

Las tendencias tecnológicas requeridas para satisfacer las necesidades de la sociedad actual demandan una elevada producción, almacenamiento, transporte y utilización de hidrocarburos, por lo que existe un riesgo potencial de que ocurran accidentes en alguna de estas etapas.

Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes: (i) manejo inadecuado y abandono de materiales y residuos peligrosos; (ii) mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras; (iii) explosiones en instalaciones de alto riesgo; (iv) fugas en líneas de conducción; (v) derrames de hidrocarburos (CENAPRED, 2001; PROFEPA, 2002).



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) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX, 2001). Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el pantano de "Santa Alejandrina", ambos ubicados en el sureste de México.

### 2.3. La contaminación del suelo del campo petrolero Cinco Presidentes.

El campo petrolero Cinco Presidentes se localiza dentro de los  $18^{\circ} 13' 36''$  de latitud Norte y los  $94^{\circ} 1' 36''$  de longitud Oeste, en la porción noroeste del estado de Tabasco (Figura 2.2). Forma parte del Activo Cinco Presidentes, el cual está compuesto por 8 campos petroleros principales: La Venta, Blasillo, Otates, Ogarrio, Sánchez Magallanes (Norte y Sur), San Ramón, Rodador y Cinco Presidentes.



Figura 2.2. Estado de Tabasco. Ubicación de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo y del campo petrolero Cinco Presidentes.

Abarca parte de los ejidos Aquiles Serdán y Arrozal así como de los cuerpos de agua denominados Río Chicozapote y laguna El Yucateco en el municipio de Huimanguillo; en el municipio de Cárdenas comprende parte del ejido Ley Federal de la Reforma Agraria y Colonia El Pailebot, cubriendo aproximadamente 3,000 ha de las cuales dos terceras partes son ocupadas por pozos lacustres. (Leyva, 2006)

Este campo petrolero comenzó su desarrollo a finales de la década de los años 50's, en su inicio todo el equipo se movilizó por vía fluvial (barcos, barcazas) y aérea. La expansión del campo se fincó en dos etapas: terrestre y lacustre (dentro de la laguna El Yucateco). En el área lacustre los trabajos se realizaron dragando en los pantanos un sistema de 41 drenes, los cuales alteraron drásticamente el escurrimiento natural así como importantes áreas de manglar. Se perforaron 101 pozos lacustres y los desechos generados en la etapa de perforación no contaron con ningún tratamiento y se depositaron directamente a los canales lacustres impactando a los recursos naturales vegetales y acuáticos de la zona. Hoy en día la actividad que se realiza en este campo petrolero es mínima, ya que del total de 321 pozos que fueron activos, para 1994 solo se encontraban activos 59 en la zona terrestre y 9 en la lacustre. El hidrocarburo obtenido se conduce por una red de ductos a las baterías de separación primaria donde se realiza la separación de componentes líquidos (hidrocarburos y agua salada) y los gaseosos fluyendo ambos por ductos separados. Teóricamente no deberían producir contaminación pero daños al equipo y situaciones de emergencia suelen ser causa de deterioro ambiental. (Leyva, 2006)



cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

ARTÍCULO 136.- Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar: I. La contaminación del suelo; II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos; III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y IV. Riesgos y problemas de salud.

ARTÍCULO 139.- Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

ARTÍCULO 140.- La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Además de estos artículos también encontramos en los capítulos III de Política Ambiental y VI de Materiales y Residuos Peligrosos, los artículos 15 y 152BIS respectivamente, que competen a la contaminación de suelos:

En la fracción IV del artículo 15 se consigna que quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales.

El artículo 152 BIS establece que la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos produzca contaminación del suelo, los responsables de

dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable, para el periodo o zona respectiva. (LGEEPA, 2006)

El 29 de marzo del 2005 el Diario Oficial de la Federación publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Esta norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para quienes resulten responsables de la contaminación con hidrocarburos en suelos. Su vigilancia del cumplimiento corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

Los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla 2.1. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo*

FRACCION DE HIDROCARBUROS	Uso de suelo predominante <sup>1</sup> (mg/kg base seca)			Método analítico
	Agrícola <sup>2</sup>	Residencial <sup>3</sup>	Industrial	
Ligera	200	200	500	Anexo A.1
Media	1,200	1,200	5,000	Anexo A.2
Pesada	3,000	3,000	6,000	Anexo A.3

## 2.5. Tecnologías de Remediación de Suelos

En México existen extensas áreas contaminadas con hidrocarburos del petróleo (HTPs), por lo cual hoy en día una de las mayores preocupaciones de las autoridades ambientales es encontrar y/o desarrollar tecnologías que permitan la eliminación de este tipo de contaminantes.

Existen numerosos documentos que presentan una lista grande de tecnologías de limpieza de suelos contaminados: Un ejemplo es el libro de Riser-Roberts (1999). Este separa las tecnologías de tratamiento en dos grandes grupos: Procesos In Situ y procesos Ex Situ. (Rivera Cruz, 2004).

**In Situ:** Es el proceso de limpieza de suelos realizado en el propio lugar donde se encuentra el suelo contaminado, sin que se involucre la excavación del mismo.

**Ex Situ:** Se caracteriza porque el suelo necesita ser excavado para ser restaurado, puede realizarse sobre el mismo sitio de contaminación, a un lado o ser transportado a otro lugar.

Las tecnologías utilizadas en ambos casos pueden ser biológicas, físicas, químicas o térmicas.

En la tabla 2.2. se indican y caracterizan las tecnologías In Situ más comúnmente utilizadas en nuestro país, así mismo, en la tabla 2.3. se presentan las Ex Situ.

*Tabla 2.2. Técnicas In Situ de Limpieza de suelos. (Fuente: Rivera Cruz, 2004).*

<b>Técnica</b>	<b>Características</b>
Extracción de Vapores del suelo y aspersión de aire.	Basado en la extracción de los contaminantes de un suelo en forma de vapor. Se utiliza en zonas no saturadas o zona de aireación
Enjuague de suelo	Basada en la inyección de agua con un aditivo como ácidos, bases o agentes tensoactivos.
Barreras Electrocinéticas	Aplicación de corriente eléctrica que produzca electroósmosis y migración iónica entre los electrodos.
Verificación	Calentamiento eléctrico de un suelo contaminado hasta conseguir su fusión.
Estabilización y Solidificación	Mezcla con aditivos (cemento, silicatos, polímeros orgánicos). Se persigue modificar las características físicas de la masa contaminada.
Tratamientos Biológicos: Atenuación Natural Bioaumentación Bioestimulación Bioventeo Fitoremediación	Basado en la degradación de sustancias contaminadas mediante la utilización de microorganismos como bacterias, hongos y levaduras. Aplicación de nutrientes para eficientizar la actividad microbiana, adición de oxígeno y el establecimiento de plantas tolerantes al contaminante.

Tabla 2.3. Técnicas Ex Situ de Limpieza de suelos. (Fuente: Rivera Cruz, 2004).

Técnica	Características
Lavado de suelo	Combina el empleo de agua con aditivos químicos y un sistema mecánico de decantación
Desorción Térmica	Calentamiento del suelo contaminado a una temperatura que oscila entre 90 y 540 °C, para conseguir que los contaminantes que tengan un punto de ebullición bajo, pasen a fase vapor.
Extracción con solventes	Separa y concentra los contaminantes, posteriormente se tratan con otra técnica. Las sustancias que se utilizan como solventes son dióxido de carbono, acetona, metanol, éter dimetílico, propano, butano o hexano.
Deshalogenación Química	Separa los halógenos de un contaminante para disminuir su peligrosidad. Se aplica mediante deshalogenación con glicolatos y descomposición catalizada por bases.
Tratamientos Biológicos Biolabranza En fase de lechada: Composteo Bioaumentación Bioestimulación Bioventeo Fitoremediación	El suelo se extrae por excavación, el tratamiento es en fase lechada, en fase sólida o en biopilas. Se utilizan microorganismos como bacterias, hongos y levaduras, se aplican nutrientes para mejorar la actividad microbiana, adición de oxígeno y el establecimiento de plantas tolerantes al contaminante.

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, 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 (HTPs, HAP), lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación (SEMARNAT, 2002).

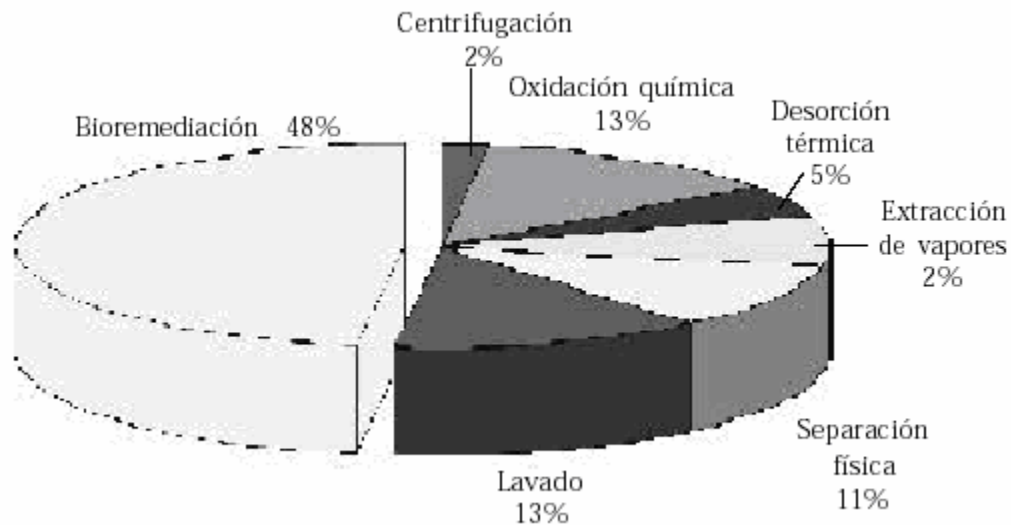


Figura 2.4. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México por empresas autorizadas (Fuente: SEMARNAT, 2002).

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados con diferentes tipos de contaminantes, el método más utilizado es el biológico (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 2.4.).

Aunque cada día se conocen más técnicas de remediación de suelos, es necesario conocer en cada caso cuál o cuáles pueden ser más efectivas y adecuadas según las características del suelo y el tipo de contaminante que se quiera limpiar. No hay que olvidar que una tecnología puede resultar exitosa para un sitio contaminado mientras en otro, con condiciones diferentes, puede no tener la eficacia esperada, por lo que el análisis debe llevarse a cabo en cada caso. (Iturbe et al, 1998).



## **2.6. Lavado de Suelos**

### **2.6.1. El proceso de Lavado de Suelos**

El lavado de suelos es una técnica de remediación que consiste en poner en contacto el sustrato con una solución de lavado y mediante la agitación lograr la remoción de los contaminantes. Se trata de una tecnología *ex situ*, ya que el suelo necesita ser excavado y trasladado para llevar a cabo la restauración.

El proceso remueve los contaminantes del suelo de las siguientes maneras:

- Disolviendo o suspendiéndolos en la solución de lavado
- Concentrándolos en un volumen menor de suelo al llevarse a cabo una separación de los tamaños de partícula pequeños de los grandes.

Este último concepto está basado en que la mayoría de los compuestos inorgánicos u orgánicos tienden a unirse, ya sea en forma física o química al limo, a la arcilla y a las partículas orgánicas del suelo, y estos a su vez se unen a las partículas de grava y arena por medios físicos, primordialmente, la adhesión y compactación. Así el proceso de lavado al separar la fracción fina (limo y arcilla) de la gruesa (grava y arena) viene a separar también y a concentrar los contaminantes en un menor volumen de suelo que posteriormente puede ser tratado con algún otro método (como incineración o medidas biocorrectivas) o ser debidamente dispuesto según las normas estatales y federales.

Cuando el suelo contiene una gran cantidad de limo y arcilla los contaminantes se unen más fácilmente al suelo y por lo tanto son más difíciles de separar, entonces cuanto mayor sea el porcentaje de arena gruesa y grava en el material a tratar más eficiente será el lavado del suelo en función del costo. Idealmente el proceso de lavado de suelo reduciría el volumen en un 90% (lo cual significa que solo el 10% del volumen original necesitaría tratamiento ulterior). (López, 2004)

A la porción de suelo de mayor tamaño de particular, que se encuentra entonces más limpia, se le realizan pruebas para determinar la concentración de los contaminantes, y se decide si el material puede usarse en el sitio, en otro lugar como relleno o si es necesario que se someta a otro ciclo de lavado ya que muchas veces una sola operación de lavado no es suficiente y es necesario repetir el proceso dos o hasta tres veces como lo reporta Iturbe et al. (2004) o a la aplicación de un tratamiento diferente. El limo y la arcilla contaminados se encuentran en el agua de lavado se asientan y se separan, pero parte de la contaminación se queda en el agua, por lo que es necesario darle un tratamiento para que pueda ser destinada a otros usos.

El lavado de suelos no se trata de una sola operación sino de varias que en su conjunto logran la limpieza del suelo. Sin importar si el proceso completo es simple o sofisticado generalmente podemos dividirlo en los siguientes módulos, (Kuhlman et al, 1999):

- *Preparación del suelo:* Elimina el material de gran tamaño, piedras y escombros
- *Lavado de suelo:* Donde se lleva a cabo la remoción de los contaminantes.
- *Tratamiento de agua:* El suelo y los contaminantes dispersos en el agua son eliminados.
- *Manejo de residuos:* El material contaminante debe de ser tratado por alguna técnica o debidamente dispuesto.
- *Control de emisiones volátiles.*
- *Manejo y almacenamiento del agua de lavado:* El agua de proceso puede ser recilcada, pero además es necesario añadir agua nueva, debido a que parte se queda en el suelo lavado.

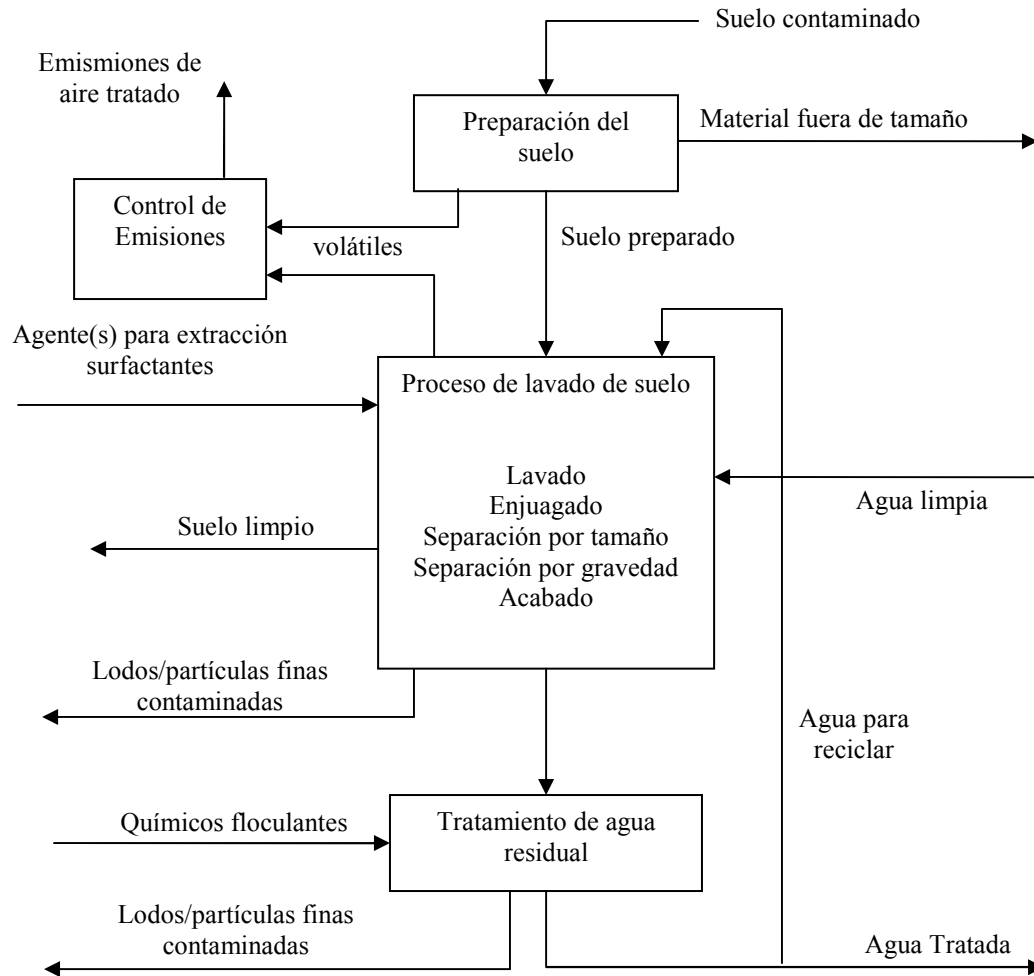


Figura 2.5. Esquema general del proceso de lavado ex situ y extracción química (Iturbe et al., 1998)

El lavado de suelo se utiliza para tratar una amplia gama de contaminantes, como metales, gasolina, diesel 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 ex situ
- Ofrece la posibilidad de retirar una gran variedad de contaminantes del suelo
- Es muy recomendable en función del costo porque puede usarse como tratamiento preliminar, reduciendo considerablemente la cantidad de material que necesita tratamiento posterior con otro método.

- Produce un material más uniforme para la aplicación de alguna otra técnica
- Pueden tratarse suelos con una contaminación alta. (lo que no ocurre en los métodos biológicos)
- El tiempo de tratamiento es menor con respecto a otras técnicas.

La eficiencia con que se lleva a cabo la limpieza de un sitio depende de diversos factores como son la cantidad de limo, arcilla y escombros que existan, el tipo de suelo y el tipo y la cantidad de contaminante. El tiempo que tomará realizar la operación puede ser desde unas pocas semanas hasta varios meses, pero en general para 28 000 toneladas deberá ser menor a tres meses.

Generalmente, para mejorar el proceso de lavado al agua se le añaden aditivos como ácidos, bases, alcoholes, quelantes o surfactantes. El tipo de aditivo que necesitará el tratamiento depende de los contaminantes que se encuentren en el suelo que se desea remediar. Cuando se trate de compuestos que son solubles en agua, como alcoholes, acetona o metil etil cetona, el uso de cualquier aditivo no es necesario.

Las disoluciones ácidas (mezcla de agua y ácido como nítrico o clorhídrico) se usan para extraer metales y contaminantes orgánicos que se encuentran en el reciclaje de baterías y en procesos de cromado industrial. Las soluciones básicas (por ejemplo agua y sosa) se usan para tratar fenoles y algunos metales.

Los surfactantes se usan para remover compuestos hidrofóbicos, como pueden ser pesticidas clorados, PBCs, semivolátiles (bencenos clorados, naftaleno, etc), productos de petróleo (gasolina, diesel, keroseno, crudo, aceites entre otros), plastificantes y solventes aromáticos (benceno, tolueno, xilenos, etilbenceno). El uso de soluciones de surfactantes es particularmente muy atractivo para el proceso de lavado de suelo debido a que generalmente tienen una toxicidad baja y una biodegradabilidad favorable por lo que son más amigables con el ambiente que otros aditivos como los solventes orgánicos.

### **2.6.2. Surfactantes**

Los surfactantes (del inglés surface active agent) son moléculas anfifílicas, es decir que cuentan con dos componentes principales: una porción hidrofílica o soluble en agua (cabeza) y otra porción hidrofóbica o insoluble en agua (cola). La parte hidrofóbica generalmente se trata de cadenas de hidrocarburos que contienen 12 o más átomos de carbono. Las porciones hidrofílicas usualmente son iónicas (por ejemplo:  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{SO}_4^-$ ,  $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ ) o polares (cadenas de oxietileno,  $-\text{NH}_2$ , etc).

Debido a la naturaleza dual los surfactantes en solución tienden a concentrarse en la interfase del agua con el aire, donde las cabezas se mantienen inmersas en el agua y las colas en el aire, provocando la reducción de las energías interfaciales.

A bajas concentraciones, los tensoactivos existen solo en forma de monómeros, pero si su concentración se aumenta llegará un momento en que la superficie interfacial se encontrará satisfecha y las moléculas comenzarán a aglomerarse en micelas. En estas estructuras las porciones hidrofóbicas se encuentran en el interior de la micela, sin tener contacto con el agua mientras que las cabezas hidrofílicas se encuentran en la superficie de la micela. (Wilson et al, 1994)

La concentración de surfactante a la que las micelas se empiezan a formar se le llama concentración micelar crítica (CMC), y esta varía para cada surfactante dependiendo del tipo que se trate (iónico o no iónico), de su identidad y de el contenido total de sales que existan en la solución (Tabla 2.4.). (Deshpande et al, 1999)

Las soluciones de surfactantes que contienen estas moléculas en concentraciones sustancialmente mayores a la CMC contienen un volumen bastante significativo de fase no polar en el interior de las miscelas. Debido a esto la fase no polar es capaz de disolver solutos no polares (compuestos hidrofóbicos como PBCs, solventes orgánicos, derivados del petróleo entre otros). Este fenómeno es conocido como solubilización miscelar.

Tabla 2.4. Concentraciones Micelares Críticas para diferentes surfactantes.

Surfactante	Nombre Químico	Naturaleza	Peso Molecular g/mol	CMC (mg/L)
Tween 80	Monoleato de sorbitán Poe=20	No iónico	1308	65.4
Brij 35	Lauril éter Poe=23	No iónico	1206	39.6
Brij 58	Cétil éter Poe=20	No iónico	1122	84.15
Emulgin 600	Nonil fenol Poe=6	No iónico	483	45.06
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	No iónico	660	49.5
Texapon 40	Lauril éter sulfato de sodio	Aniónico	442	1,458
SDS	Dodecil sulfato de sodio	Aniónico	288.4	400
Maranil Lab	Dodecil bencen sulfato de sodio	Aniónico	348	1,392
Polafix CAPB	propil-cocoamida betaína	Zwitteriónico	359	100, 400

Los surfactantes se clasifican de acuerdo a su poder de disociación en presencia de un electrolito y de sus propiedades fisicoquímicas. Pueden ser iónicos o no iónicos; y dentro de los iónicos según la carga que posea la parte que presenta la actividad de superficie serán: aniónicos, catiónicos y anfotéricos o zwitteriónicos. (Salaguer et al, 2002)

### Surfactantes Iónicos

Son los que se disocian en agua, y gracias a su fuerte afinidad por esta, motivada por su atracción electrostática hacia los dipolos del agua puede arrastrar consigo a las soluciones de cadenas de hidrocarburos. (López, 2004). Este tipo de surfactantes se clasifica en aniónicos, catiónicos y anfotéricos o zwitteriónicos:

### Surfactantes Aniónicos

Se les da este nombre porque el extremo polar de la molécula es un anión. Se encuentran costituidos por una cadena alquílica lineal o ramificada que consta generalmente de 10 a 14 átomos de carbono. Estos se disocian en un anión anfílico y en un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. (López, 2004).

Los surfactantes aniónicos contienen generalmente uno de cuatro grupos polares solubles carboxilato, sulfonato, sulfato o fosfato, combinado con una cadena hidrocarbonada hidrófoba. Si esa cadena es corta son muy hidrosolubles, y en caso contrario tendrán baja hidrosolubilidad.

Algunos ejemplos de surfactantes aniónicos son los derivados del ión sulfato o de sulfonatos como el dodecil sulfato de sodio o el dodecil bencen sulfonato de sodio.

### **Surfactantes Catiónicos**

Los surfactantes catiónicos comúnmente utilizados en detergentes, agentes limpiadores, líquidos lavaplatos y cosméticos están compuestos por una molécula lipofílica y otra hidrofílica, consistente de uno o varios grupos amonio terciarios o cuaternarios, en solución forman iones, resultando cargado positivamente el grupo hidrófobo de la molécula. Las sales de cadenas larga de amonio terciarias, obtenidas por neutralización de las aminas con ácidos orgánicos o inorgánicos, son raramente usadas en detergentes y preparaciones para limpieza. Su principal aplicación esta en el tratamiento de textiles y ocasionalmente como suavizantes tipo rinse. En aplicaciones cosméticas, su aplicación esta restringida a especialidades.

Las sales de amonio cuaternarias con un solo grupo alquilo (C12-C18), o dos grupos mas cortos (C8-C10) son usados como sustancias activas antimicrobiános. Debido a su capacidad para adsorber sobre fibras o cabello, los inicialmente mencionados sirven como acondicionadores para el cabello.

### **Surfactantes anfotéricos o zwitteriónicos**

Los surfactantes anfotéricos como su nombre lo indica, actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son catiónicos. Como representante de este grupo podemos mencionar a las betaínas.

## **Surfactantes no iónicos**

En contraste a sus contrapartes iónicas, los surfactantes no iónicos se disuelven pero no se disocian en iones hidratados en medios acuosos. Esta clase de tensoactivos posee propiedades hidrofílicas que dependen de los grupos polifuncionales que forman enlaces de hidrógeno. Estos son el resultado de la agregación de una o varias moléculas de óxido de etileno en un alcohol graso o al fenol. Ejemplo de estos tensoactivos son el nonil fenol etoxilado o el nonanol etoxilado. En los agentes tensoactivos no iónicos el grupo hidrofóbico está formado por una cadena larga que contienen una serie de grupos débilmente solubilizantes (hidrofílicos) tales como enlaces éter o grupos hidroxilos en sus moléculas.

La repetición de estas unidades débiles tiene el mismo efecto que un hidrófilo fuerte, pero no hay ninguna ionización. Tienen la ventaja de que son estables con la mayoría de los productos químicos en las concentraciones usuales de empleo. Al no ionizarse en agua forman sales con los iones metálicos y son igualmente efectivos en aguas blandas y duras. Su naturaleza química los hace compatibles con otros tensoactivos aniónicos, catiónicos y coloides cargados positiva y negativamente. (López, 2004) Las aplicaciones son extensas y dependen de la cantidad de grupos polares presentes, que determinaran la solubilidad tanto en agua como en aceite (cuantificada en la practica mediante el índice HLB, o balance hidrofílico - lipofílico).

Como podemos ver existen diferentes tipos de surfactantes, y en cada tipo podemos encontrar una gama muy amplia de estos. La selección del surfactante que se va a usar para un lavado de suelo es crucial para que el proceso se lleve a cabo exitosamente. Un surfactante apropiado maximizará la remoción del contaminante.

Desphande (1999) realizó un trabajo donde se expone una guía simple para la elección del surfactante a usar en el proceso de lavado de suelo, en ella propone probar tanto los iónicos como los no iónicos y evaluar su desempeño a concentraciones menores y mayores que su concentración miscelar crítica (de 0.25 a 25 veces la CMC).



Además de estudios donde se prueban diferentes tipos de surfactantes como el de Desphande (1999) o Torres et. al. (2003 y 2005) se están realizando pruebas con combinaciones de ellos, en algunos casos se ha observado que se obtienen mejores resultados pero en otros la eficiencia del lavado baja considerablemente.

Xia Xing-hui (2000) realizó lavados de suelo utilizando una solución de surfactante no iónico, alcohol polietoxilado (AEO-9) al 1%, una de aniónico, alcohol polietoxilado de sodio (AES) al 0.2%, y una mezcla de ambos (AEO-9 al 0.5% y AES al .1%) y obtuvo las mejores eficiencias de lavado en este último caso. Torres et. al. (2007) evaluó las eficiencias de lavado de la goma guar y de LBG, y obtuvo remociones de hidrocarburo del 49.6% y 47.7% respectivamente, posteriormente mezcló estas gomas naturales con surfactantes sintéticos (Tween 80 y Dodecil Sulfato de Sodio), las remociones obtenidas para diferentes combinaciones no superaron nunca el 34 %, por lo que en este caso la combinación de las sustancias resultó desfavorable.

También se han realizado pruebas de lavado donde se mezclan los surfactantes con otro tipo de sustancias como pueden ser diferentes sales. López (2004) reportó el efecto de la adición de cloruro de sodio en la capacidad de remoción del Dodecil Sulfato de Sodio, obtuvo un 56% de remoción para la solución del tensoactivo sin sal, y un 70 % con la solución de tensoactivo y la adición de 1% de sal. La mejora para este caso es bastante, sin embargo hay que tener en cuenta que parte de esta sal añadida se quedará en el suelo.

## **2.7. Mezclado**

### **2.7.1. Generalidades**

En forma general el mezclado puede ser definido como “la incorporación de dos o más porciones disímiles de un material, con lo que se logra un nivel deseado de uniformidad, ya sea físico o químico, en el producto final”. La agitación está incluida en esta definición, pero además se crea un estado de actividad tal como flujo o turbulencia.

Las operaciones de mezclado son en ocasiones llevadas a cabo en un nivel muy grande de empirismo. Esta situación, se debe en parte a que los ingenieros no están suficientemente capacitados en los fundamentos de las operaciones de mezclado como para que les permita, al menos seleccionar adecuadamente un tipo de impulsor para determinada aplicación. Adicionalmente el mezclado es una de las operaciones unitarias más difíciles de someter a un análisis científico. Hasta el presente no se han desarrollado códigos de diseños de equipos de mezclado que sean ampliamente aceptados

El mezclado involucra algunos aspectos básicos relacionados con el efecto de la geometría, de las dimensiones y la estructura del tanque, así como el impulsor o impulsores que serán utilizados en un proceso determinado. La acertada especificación del tanque y de los parámetros del proceso es crucial para obtener una buena operación de mezclado. Algunas de las variables que afectan esta operación y que por lo tanto deben ser consideradas para el diseño del proceso de mezclado se explican a continuación.

#### **Impulsor**

Un impulsor es un dispositivo rotatorio que fuerza a los líquidos, gases o sólidos a moverse hacia cierta dirección. El movimiento provocado por él se describe mediante patrones de flujo primario y secundario. El movimiento primario es el flujo rotacional o tangencial del fluido. La mayor parte de la energía transferida del impulsor al fluido es

consumida por este movimiento, aun cuando es de menor importancia en procesos relacionados con el mezclado.

Por otra parte, el movimiento secundario está asociado a componentes axiales o radiales. En procesos de mezclado, el movimiento secundario es la parte más importante del patrón de flujo y solo una pequeña fracción de la energía transferida al fluido está relacionada a este movimiento.

La variedad de impulsores para la agitación de fluidos es muy amplia, de forma general se pueden clasificar en aquellos que generan predominantemente flujo axial y los que generan predominantemente flujo radial.

Ningún diseño de impulsor es capaz de tener un rendimiento óptimo bajo diferentes condiciones de proceso, por lo que el rendimiento del mismo proceso depende de la adecuada selección de éste.

### **Número de Impulsores**

Por cuestiones de costo generalmente se prefiere el uso de solo un impulsor, sin embargo existen casos en los que la relación del nivel del líquido con el diámetro del tanque puede generar un efecto adverso en los patrones de flujo, por lo que se pueden llegar a necesitar mas de un impulsor. Esta relación de altura y diámetro no es la única consideración para determinar que el uso de más impulsores es necesario, también pueden influir otros factores en esta decisión como la alta viscosidad de la mezcla o la necesidad de mezclado a niveles bajos del tanque al estarse llenando o vaciando.

### **Posicionamiento del Impulsor**

Sin importar si se usa uno o más impulsores el posicionamiento de los impulsores dentro del tanque tiene efectos muy significativos en el rendimiento del proceso. Si el impulsor es mal posicionado el resultado podría ser que se tuviera una pobre dispersión de las fases o componentes.

**Razón D/T**

La relación entre el diámetro del impulsor (D) y el diámetro del tanque (T) tiene un efecto muy significativo en la ejecución del proceso, la razón D/T óptima es función de los requerimientos como de las condiciones del proceso.

**Altura del impulsor**

La altura a la cual se encuentra el impulsor también puede tener un efecto muy significativo en el proceso de mezclado ya que afecta tanto la eficiencia de bombeo como la potencia consumida. La altura del impulsor depende del tipo de impulsor y de las condiciones de proceso.

**Geometría del tanque**

Cuando se diseña un tanque de mezclado es importante entender el rol que juega la geometría en la determinación del diseño final del mezclador. Las bases con formas inapropiadas o diámetros inapropiados del tanque pueden dar como resultado el incremento del costo del mezclador así como también el que sea prácticamente imposible optimizar el diseño completo.

**Razón z/T del Tanque**

En general es aceptado que la razón ideal para la mayoría de los tanques de mezclado es en el cual la altura del líquido (z) es igual a el diámetro del tanque(T), pero en la practica se utiliza una relación de z/T entre 0.9 y 1.2.

**Forma de la base del tanque**

La forma de la base del tanque puede tener un efecto significativo en los patrones de flujo que se generen. Normalmente la forma de plato es la preferida para los fondos, sin embargo las bases planas también se usan mucho.

## Deflectores

La presencia de deflectores en un tanque de mezclado es muy importante, ya que estos permiten que se desarrolle el régimen de flujo requerido para alcanzar un resultado en el proceso aceptable.

Un tanque en el cual no se han colocado los deflectores apropiadamente puede dar como resultado un pobre rendimiento del proceso o hasta puede ser que el mezclador no sea capaz de lograr el resultado para el cual fue diseñado.

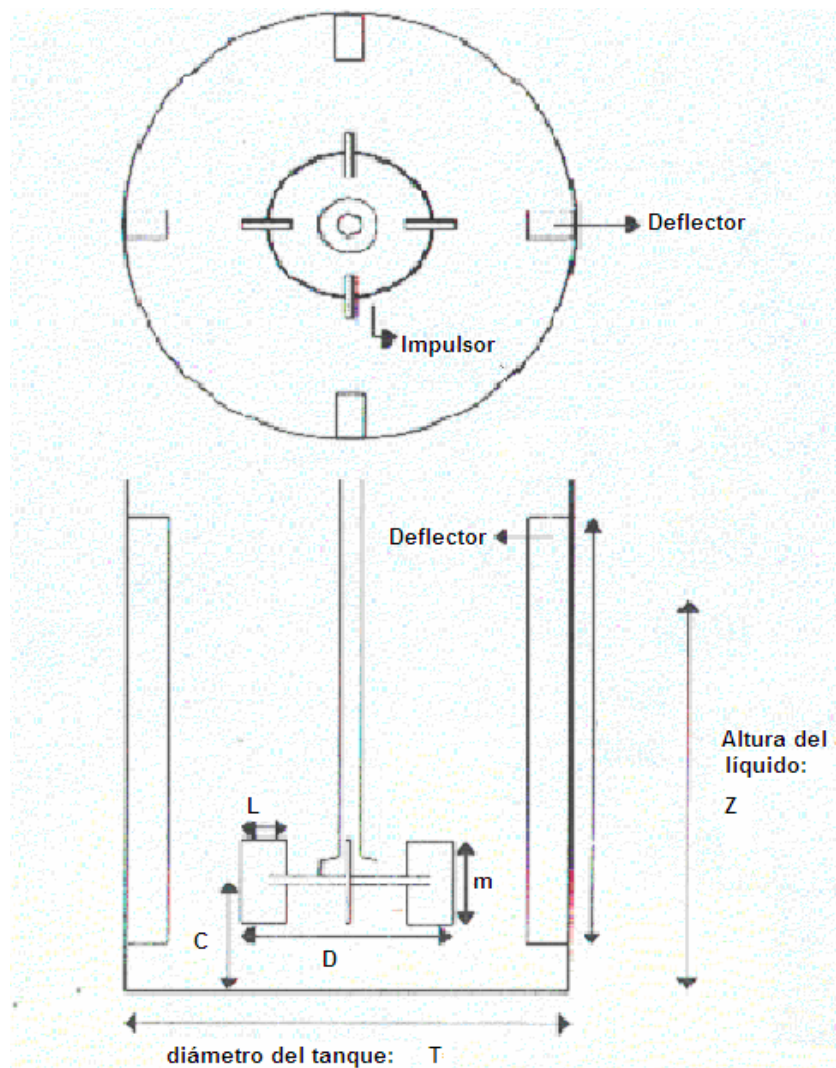


Figura 2.6. Estructura del Tanque de Lavado

### 2.7.2. Suspensión de Sólidos

La suspensión de sólidos por medio de tanques mecánicamente agitados es una de las operaciones más comunes en la industria química y en campos relacionados como es el de ingeniería ambiental y más específicamente en el lavado de suelos. Esta operación permite tener a dos fases, una sólida y una líquida, en contacto simultáneo.

En la mayoría de los casos es de gran importancia el proveer la suficiente agitación para lograr un estado de suspensión total de los sólidos, en donde todas las partículas del sólido se encuentren en contacto con la fase líquida y ninguna partícula permanezca en contacto con el fondo del tanque por más de uno o dos segundos. Por debajo de este estado de suspensión total el área interfacial entre el líquido y el sólido no es completamente o eficientemente utilizada. Por arriba de este estado el incremento en la transferencia de masa será mínima y además se estará añadiendo al sistema una energía adicional que para algunos tipos de proceso sobra y no es útil (Armenante *et al* , 1997; Thanapalan, 1999), sin embargo para otros procesos, como es el caso del lavado de suelo, esta energía adicional es bien aprovechada.

Debido a la baja eficiencia de cualquier proceso de mezclado que trabaje por debajo de la suspensión total de sólidos es muy importante determinar la velocidad mínima de agitación ( $N_{js}$ ) a la cual se alcanza el estado de suspensión total de sólidos.

Se han realizado muchas investigaciones sobre la determinación de la  $N_{js}$  y de su dependencia en ciertas variables geométricas, físicas y de operación (Zwietering, 1958, Armenante 1998). Como ejemplo de una fórmula para la estimación de la  $N_{js}$  tenemos la reportada por Armenante (1998):

$$N_{js} = 3.06 \left( \frac{T}{D} \right)^{1.33} \exp \left( 0.44 \frac{C_b}{T} \right) D^{-0.63} x^{0.13} d_p^{0.02} v^{0.1} \left( \frac{g \Delta \rho}{\rho_L} \right)^{0.45}$$

Donde:

$N_{js}$ : velocidad mínima de agitación para suspender totalmente los sólidos (rps)

T: diámetro del tanque (m)

D: diámetro del impulsor (m)

$C_b$ : distancia del límite inferior del impulsor al fondo del tanque (m)

X : porcentaje en peso de sólidos (g/g x 100)

$d_p$ : tamaño de partícula

$\nu$ : viscosidad cinemática del líquido ( $m^2/s$ )

$g$ : constante gravitacional,  $9.81 m/s^2$

$\Delta\rho$ : diferencia de densidades entre el sólido y el líquido  $kg/m^3$

$\rho_L$  : densidad del líquido  $kg/m^3$

Thanapalan (1999) realizó un breve análisis de los resultados publicados por diferentes investigaciones donde se buscaba llegar a una ecuación para la estimación de la  $N_{js}$  y encontró que difieren bastante ya que la mayoría de las estimaciones de esta velocidad se encuentran restringidas para un rango de aplicaciones limitado.

No es fácil determinar la  $N_{js}$  ya que son muchas las variables de las que depende, como el tipo de impulsor, la altura a la que se encuentra este, el diámetro del impulsor y del tanque, la geometría del tanque, el tamaño de partícula, el porcentaje de sólidos, la densidad del sólido y del líquido, la viscosidad, entre otras.

### **2.7.3. Números Adimensionales en Mezclado**

En Ingeniería Química o Bioquímica, es común presentar las correlaciones en términos de números adimensionales. Para este caso, las relaciones de potencia se han reportado en función del número de potencia y el número de Reynolds.

#### **Número de Reynolds**

El número de Reynolds para fluidos Newtonianos se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{ND^2\rho}{\mu}$$

Donde:

Re: número de Reynolds (adimensional)

N: velocidad de agitación (1/s)

D: diámetro del tanque (m)

$\mu$ : Viscosidad dinámica ((m\* kg)/s)

P: Densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)

## Número de Potencia

Mediante gráficas, como la de la figura 2.7, donde se relaciona el número de potencia contra el número de Reynolds, se puede obtener el número de potencia para cada impulsor para los diferentes números de Reynolds.

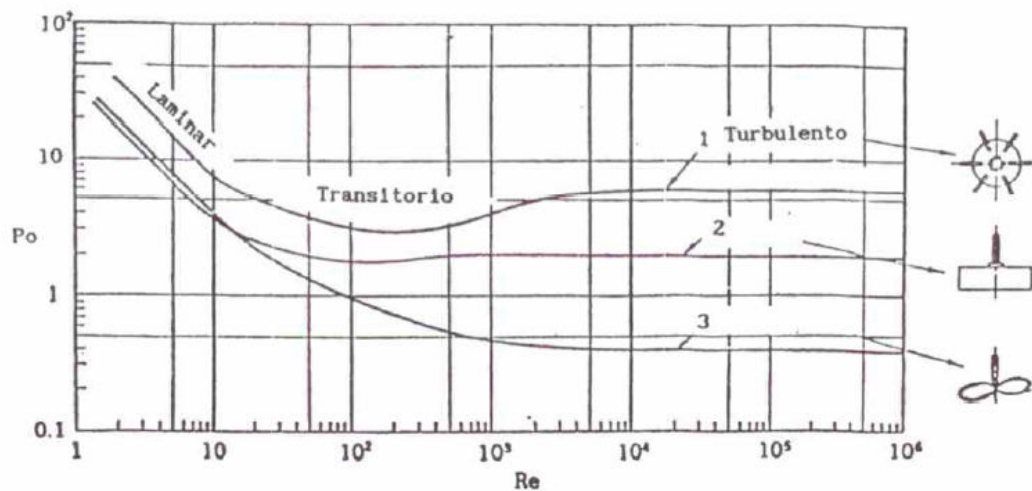


Figura 2.7. Número de potencia contra el número de Reynolds (Ruston et al (1950))

## Cálculo del Consumo de Potencia por agitación.

La potencia suministrada a un tanque agitado es información muy útil, ya que de ello depende la capacidad de un sistema de agitación para mezclar el fluido. Para calcular la potencia suministrada (P) por cada impulsor, esta se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Po = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

Po: número de potencia (adimensional)

P: potencia suministrada por el impulsor (W)



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Estudiar la operación de mezclado en el lavado de suelos contaminados con hidrocarburos a nivel de tanque de un litro en proceso *batch* agitado.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar el desempeño de diferentes surfactantes y dosis en el lavado de un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo y determinar cual ofrece mejores resultados.
- Estudiar la cinética del lavado de suelo.
- Estudiar el efecto que tienen el tipo de impulsor, la velocidad de agitación y la presencia de baffles en el tanque en la remoción de los hidrocarburos totales del petróleo (TPH).
- Estudiar el consumo de potencia en la operación de lavado, y el efecto que tienen sobre esta el tipo de impulsor y velocidad de agitación.
- Analizar los datos obtenidos de eficiencia de lavado y consumo de potencia en función de los parámetros estudiados, con el fin de encontrar las condiciones idóneas de lavado.

## **4. HIPÓTESIS**

Este trabajo parte de la hipótesis de que las diferentes condiciones de operación, como lo son la velocidad de agitación, el tipo de impulsor y la presencia de deflectores en el tanque de lavado tienen un efecto tanto en la energía consumida por el proceso como en el porcentaje de remoción de hidrocarburos, y por lo tanto será posible crear combinaciones de estas variables con las que se pueda optimizar el proceso, es decir obtener una mayor remoción de hidrocarburos con el menor consumo posible de energía.

Las variables que se modificarán en este trabajo son la velocidad de agitación y el tipo de impulsor. Se trabajará con presencia de deflectores en el tanque de lavado, con impulsores de un diámetro de 5 cm y colocados a una altura de  $3/5$  el diámetro del impulsor.

Se espera que entre mayor sea la velocidad de agitación el consumo de potencia aumente y que también exista un incremento en el porcentaje de remoción de los hidrocarburos. Se trabajará por encima de la velocidad mínima de suspensión de sólidos, y aunque en la literatura expresan que arriba de esta velocidad las mejoras en algunos procesos son insignificantes, se propone la hipótesis de que por tratarse de un proceso de lavado esa energía extra ayudará al proceso y a la remoción del contaminante.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama que se expone a continuación (Figura 5.1.) pretende mostrar claramente la metodología global y la secuencia con la que se desarrollo el presente trabajo:

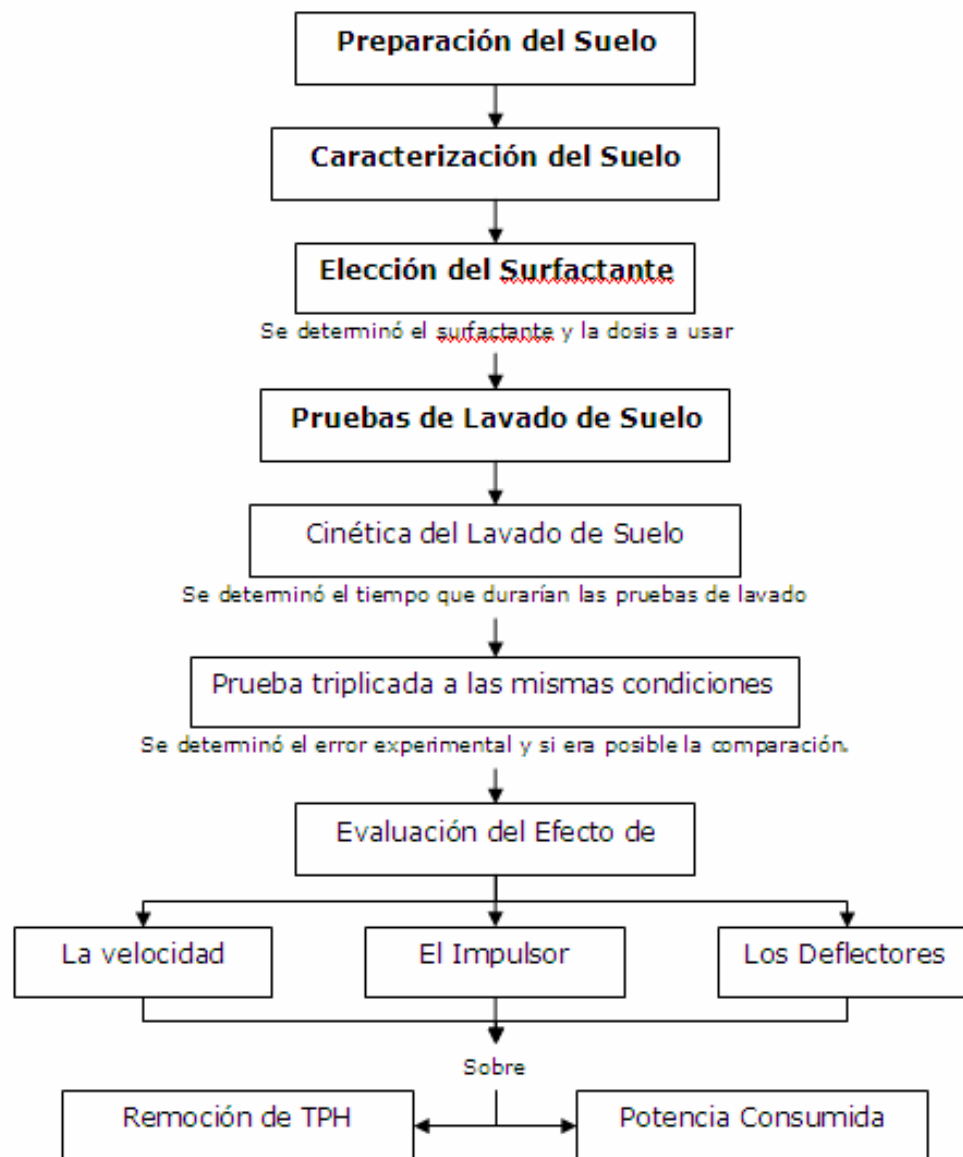


Figura 5.1. Metodología Experimental

El procedimiento experimental, en cada una de las etapas mostradas en el diagrama serán explicados con detalle en las páginas siguientes.

## 5.1. Materiales

Material	Procedencia
Vasos de precipitados de 50 mL	PYREX
Vasos de precipitados de 100 mL	PYREX
Vasos de precipitados de 500 mL	PYREX
Vaso de precipitados de vidrio de 1000 mL	PYREX
Vaso de precipitados de vidrio de 1000 mL (con deflectores)	PYREX
Probeta de 250 mL	PYREX
Matraces de bola de 250 mL	PYREX
Matraz de bola para rotovapor	PYREX
Picnómetro de 25 mL	SIMAX
Soxhlets	KIMAX
Refrigerantes	KIMAX
Tubos de ensaye	PYREX
Pipetas graduada de 10 mL	PYREX
Micropipeta de 1 mL	BRAND Transferpette
Perillas para pipeta	Cienceware
Cartuchos para extracción	Whatman
Soportes universales	AESA
Pinzas para soporte	
Termómetros	
Mangueras	
Embudo de plástico	
Guantes de latex	
Mortero	
Espátulas	
Jeringa de 5 mL	
Agitador de vidrio	

## 5.2. Sustancias

Sustancia	Procedencia
Suelo	Proveniente del campo petrolero Cinco Presidentes, Humanguillo, Tabasco
Hexano	J.T. Baker
Silicato de sodio deshidratado	J.T. Baker
Agua destilada	
Agua oxigenada	

### 5.3. Equipo y Aparatos

Equipo	Procedencia
Mallas Normalizadas	MONITOX
Estufa	Fisher
Desecador	NUCERITE
Balanza Analítica	Explorer OHAUS
Mantillos de calentamiento	
Campana de extracción	
Equipo de agitación horizontal	Construido en el Instituto de Ingeniería UNAM.
Equipo vibratorio mecánico	
Rotovapor	Heldolph
Equipo de medición de humedad	OHAUS MB200
Espectrofotómetro	Milton Roy Spectronic 20D
Agitador de flecha	Cole-Parmer-Instruments
Agitador de flecha con medidor de potencia	LIGHTNIN Labaster Mixer

### 5.4. Metodología Experimental

#### 5.4.1. Preparación del Suelo

Se utilizó suelo contaminado con crudo de la zona de la batería de separación No. 3 del campo petrolero Cinco Presidentes que se encuentra en el municipio de Huimanguillo en Tabasco (Figura 5.2.). La contaminación fue causada por derrames ocurridos en la batería No. 3. mientras esta se mantuvo activa.

Fue necesario darle una preparación previa al suelo ya que la muestra, de 40kg, en un principio se encontraba en condiciones no apropiadas para el estudio, es decir, con un alto contenido de humedad (alrededor del 30%) y de grandes rocas.

Se dejó secar al aire libre durante varias semanas y, después de haber eliminado manualmente las piedras, se observó que las partículas de un tamaño mayor eran solo pequeños aglomerados de petróleo por lo que se decidió retirarlas. Toda la muestra fue

tamizada y homogeneizada, se pasó por una malla  $\frac{1}{4}$  (MONTINOX), de 6.3mm de abertura, quedando entonces un suelo conformado por partículas menores a ese tamaño.

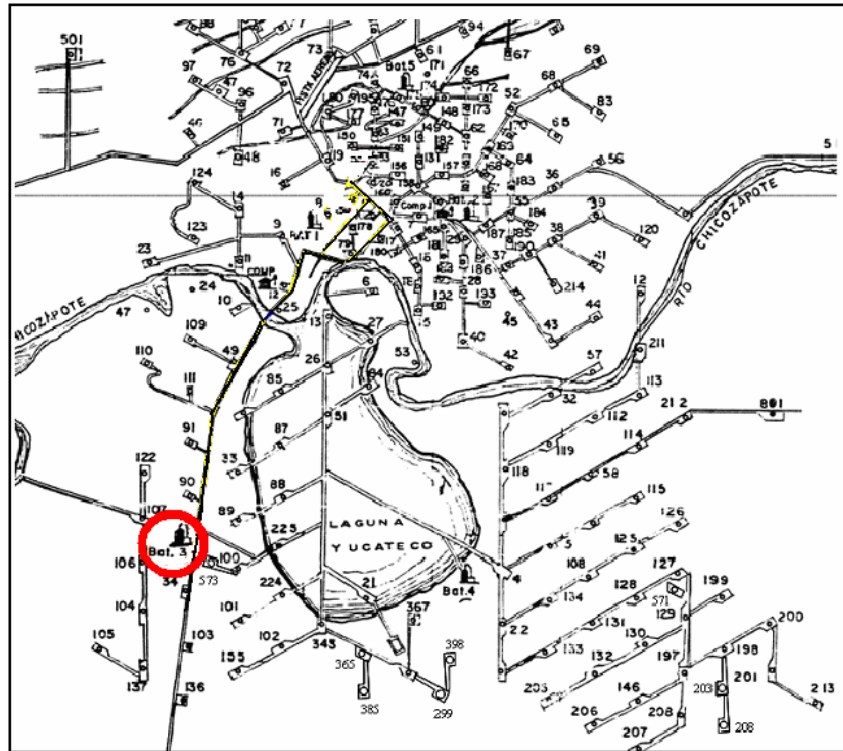


Figura 5.2. Batería de separación No. 3 del campo petrolero Cinco Presidentes en el municipio de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco.

#### 5.4.2. Caracterización del Suelo

La caracterización del suelo consistió en determinar las principales características físicas y químicas del suelo, así como sus niveles de contaminación.

Se mandaron a hacer análisis de contenido de carbón, hidrógeno y nitrógeno totales, contenido de agua, conductividad eléctrica, pH y densidad a la muestra de suelo recién llegada, es decir sin preparación previa alguna, y al suelo ya seco, tamizado y homogeneizado se le mandó a hacer la determinación de cantidad de algunos metales pesados y de calcio, potasio, sodio y magnesio.

En el laboratorio se determinaron las propiedades de granulometría, humedad, contenido de hidrocarburos totales del petróleo (TPH por sus siglas en inglés) en la mezcla de suelo y en cada una de las fracciones de tamaño (obtenidas al realizar el análisis granulométrico)

Las técnicas analíticas que se utilizaron se describen con detalle a continuación:

## **Granulometría**

La granulometría permite determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de suelo según su tamaño. Para suelos gruesos se lleva a cabo mediante una serie de mallas normalizadas, cada una con una abertura dada, que se encajan y ordenan, de abajo hacia arriba, de la de abertura más pequeña a la más grande. Las partículas retenidas en cada malla tendrán un tamaño promedio entre la última abertura que las dejó pasar y la que las retuvo.

## **Procedimiento**

- 1) Se utilizaron mallas normalizadas No ¼, 4, 6, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 marca MONITOX.
- 2) Las mallas se encajan de manera que queden, de abajo hacia arriba, de la de abertura más pequeña a la de abertura más grande. El fondo va hasta abajo.
- 3) Pesar la muestra de suelo seco que se desea tamizar, colocarla en la malla de arriba y tapar.
- 4) Sujetar la serie de mallas al equipo vibratorio mecánico y prenderlo, se dejara funcionar alrededor de unos 10 o 15 minutos, si no se cuenta con un equipo vibratorio mecánico también se puede realizar el tamizado manualmente pero tomará más tiempo.
- 5) Revisar que la separación se haya efectuado adecuadamente, si no se debe de dejar trabajar más tiempo al equipo.

- 6) Retirar con mucho cuidado de no tener pérdidas y colocar en charolitas de aluminio el suelo retenido en cada malla.
- 7) Pesar el suelo retenido en cada malla.
- 8) Trazar la curva de distribución granulométrica
- 9) Calcular los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc).

## **Humedad**

La humedad del suelo es la cantidad de agua que este tiene por unidad de masa y es directamente dependiente de los aportes externos de agua, de la capacidad de drenaje del suelo y de la evaporación (Seoáñez, 1999). Generalmente se expresa en porcentaje y su medición es gravimétrica, es decir, por diferencia de pesos entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco.

En este trabajo se utilizó, para la determinación de este factor, el equipo de medición de humedad OHAUS MB200, el cual consiste en una balanza analítica cerrada con una resistencia o lámpara que calienta el interior, de esta manera la balanza detecta el peso inicial de la muestra de suelo y el final, al haber ya evaporado toda el agua, y realiza el cálculo del porcentaje de humedad.

## **Procedimiento**

- 1) Prender el equipo de medición de humedad (OHAUS MB200) y dejar calentar por unos 20 minutos
- 2) Programar el equipo para que el calentamiento de la muestra sea por 45 minutos.
- 3) Colocar una charolita de aluminio sobre la balanza, cerrar el equipo y tararlo.
- 4) Introducir en la charolita de uno a dos gramos de suelo, cerrar el equipo y correrlo.
- 5) A los 45 minutos, el equipo hará sonar una alarma y en la pantalla se podrá leer el valor obtenido de porcentaje de humedad.
- 6) Apagar el equipo y desconectarlo.



## **Contenido de TPH**

Para determinar el contenido de TPH en el suelo se utilizó el Método 9071B de la EPA, en general este se utiliza para cuantificar la contaminación cuando se tiene en el suelo un alto contenido de hidrocarburos de fracción pesada, el método se basa en la extracción con hexano de los componentes orgánicos.

## **Procedimiento**

- 1) El matraz de bola que se usan en la técnica debe estar a peso constante, por ello se deja un día antes en la estufa y posteriormente al menos una hora en el desecador para eliminar toda la humedad, no deberá de estar en contacto con las manos, el uso de guantes de latex es indispensable para evitar que se le pegue grasa.
- 2) Prender la balanza analítica y verificar que se encuentre calibrada, pesar el matraz y anotar el peso.
- 3) Pesar en un cartucho cinco gramos de suelo y anotar el peso, pesar ahí mismo cinco gramos de silicato de sodio y mezclar bien con una espátula ambas sustancias, el cartucho se introduce dentro del soxhlet.
- 4) La extracción se debe realizar dentro de una campana de extracción debido a que se realiza con hexano.
- 5) Colocarle a un refrigerante las mangueras y sujetarlo al soporte universal con las pinzas (se deja un espacio amplio de manera que debajo de este quepan el soxlet, el matraz de bola y el mantillo), la manguera de abajo se lleva al desagüe y la de arriba se conecta a la llave de agua.
- 6) Con una probeta de 250 mL se miden 30 mL de hexano y se vacían en el matraz de bola.
- 7) Colocar el matraz sobre el mantillo, encajar el soxhlet arriba de este y posteriormente unir el equipo al refrigerante.

- 8) Abrir la llave de agua, y prender los mantillos para comenzar el calentamiento y la extracción.
- 9) Se debe cumplir con un mínimo de 80 ciclos de extracción, cada ciclo se conforma por el llenado del soxhlet con el hexano que se condensa y el vaciado de este mismo. Se tomará el tiempo que tarda cada uno para calcular el tiempo necesario de calentamiento.
- 10) Al termino de los 80 ciclos apagar el calentamiento, esperar a que el equipo se enfríe y cuando esto haya ocurrido cerrar la llave de agua, retirar el matraz de bola y llevarlo al rotovapor. Dejar que se evapore casi todo el hexano y terminar la evaporación en la estufa.
- 11) Pesar nuevamente el matraz y anotar el peso.

## Cálculos

Para calcular los gramos de hidrocarburo extraído se resta del peso final del matraz el inicial:

$$\text{Peso final del matraz (g)} - \text{Peso inicial del matraz (g)} = \text{Peso del hidrocarburo extraido (g)}$$

Para calcular las partes por millón de hidrocarburo en el suelo antes es necesario calcular el peso del suelo seco:

$$\frac{(100 - \% \text{ Humedad}) * \text{Peso de suelo húmedo (g)}}{100} = \text{Peso de suelo seco (g)}$$

De esta manera las partes por millón de hidrocarburo se calculan como sigue:

$$\left( \frac{\text{Peso de hidrocarburo extraido (g)}}{\text{Peso del suelo seco (g)}} \right) \left( \frac{1000 (mg)}{1 (g)} \right) \left( \frac{1000 (g)}{1 (kg)} \right) = \text{ppm de hidrocarburo} \left( \frac{mg}{kg} \right)$$

### 5.4.3. Elección del Surfactante

De manera teórica es muy difícil predecir la remoción de hidrocarburos que se puede obtener con cada surfactante, debido a que el comportamiento del lavado depende de factores que son muy variables como son las características químicas y físicas del suelo y las del contaminante. Por ello es indispensable realizar pruebas experimentales para elegir un tensoactivo que nos dé resultados favorables.

Para efectos de este estudio se realizaron pruebas con disoluciones de un solo surfactante o de una mezcla, a las que se les evaluó el porcentaje de remoción de hidrocarburos totales del petróleo (TPH), los surfactantes empleados fueron los siguientes:

*Tabla 5.1. Surfactantes utilizados*

<b>Surfactante</b>	<b>Nombre Químico</b>	<b>Naturaleza</b>	<b>Procedencia</b>
Surfacpol G	NR	aniónico	Polaquimia.
Surfacpol LO	Oxido de lauril miristil dimetil amina	no iónico (en condiciones neutras y alcalinas)	Polaquimia.
Tween 80	Monoleato de sorbitán Poe=20	no iónico	Droguería Cosmópolis
Brij 35	Lauril éter Poe=23	no iónico	Grupo Protinus
Brij 58	Cétil éter Poe=20	no iónico	Grupo Protinus
Emulgin 600	Nonil fenol Poe=6	no iónico	Conjunto Lar de México
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	no iónico	Conjunto Lar de México
Texapon 40	Sodio lauril éter sulfato	aniónico	Conjunto Lar de México
SDS	Sodio dodecil sulfato	aniónico	Sigma
Maranil Lab (SDBS)	Sodio dodecil bencen sulfato	aniónico	Conjunto Lar de México
Polafix CAPB	ropil-cocoamida betaína	zwitterniónico	Polaquimia.

## Procedimiento

El procedimiento que se siguió fue muy sencillo, consistió en lavar muestras de 6 gramos de suelo con 20 mL de solución de surfactante, estas se introdujeron dentro de pequeños viales y se agitaron durante 24 horas en un agitador de flecha.

Terminando el proceso el suelo lavado se dejó asentar durante dos horas para posteriormente retirar el agua y dejar secar por tres días aproximadamente.

Ya teniendo el suelo seco se le determinó el contenido de TPH para compararlo con el valor inicial, el cual fue obtenido en la caracterización del suelo y así determinar el porcentaje de remoción de cada prueba.

## Cálculos

La ecuación para obtener el porcentaje de remoción de hidrocarburos totales del petróleo es la siguiente:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{ppm de TPH iniciales} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) - \text{ppm de TPH después del lavado} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}{\text{ppm de TPH iniciales} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)} \times 100$$

### 5.4.4. Pruebas de Lavado

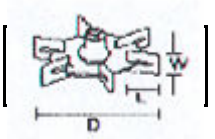

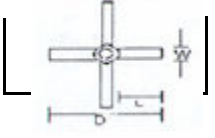
Para realizar el estudio de la operación del lavado de suelos se creó un sistema para simular un proceso batch agitado, que consistió en un tanque de un litro (vaso de precipitados de la figura 5.3.) con o sin deflectores, una base para el tanque de aluminio, un agitador de flecha y un impulsor. En el se realizaron distintas pruebas en las que se determinaron los siguientes puntos:

- El error experimental
- El efecto de las variables de tipo de impulsor, velocidad y presencia de baffles en la remoción de hidrocarburos totales de petróleo.
- El efecto de las variables de tipo de impulsor, velocidad y presencia de baffles en el consumo de potencia
- La cinética de la operación del lavado y del tiempo que durarían las pruebas.

En cada una de las pruebas se lavaron 200 gramos de suelo con 600 mL de la solución elegida de surfactante que resultó ser el dodecil sulfato de sodio (SDS por sus siglas en inglés) al 1%.

Se utilizaron tres geometrías distintas de impulsores, con las siguientes características:

Tabla 5.2. Impulsores utilizados en el presente trabajo.

Nombre	Descripción		Dimenciones	Dibujo
Rushton	6 paletas planas	Radial	D = 0.045 m W = 0.010 m L = 0.010 m	
Tres Paletas Planas	3 paletas planas	Radial	D = 0.050 m W = 0.010 m L = 0.015 m	
Cuatro Paletas Inclinas	4 paletas inclinadas 45°	Axial	D = 0.045 m W = 0.010 m L = 0.010 m	

## Procedimiento General para las Pruebas de Lavado

- 1) En un vaso de precipitados de un litro limpio y seco (con o sin deflectores, dependiendo de la prueba) se vacían 200 gramos de suelo y 600 mL de solución de surfactante SDS (dodecil sulfato de sodio) al 1%.
- 2) El equipo se monta teniendo cuidado de que la flecha se encuentre recta y centrada y el impulsor elegido para la prueba a la altura deseada, (3/5 del diámetro del impulsor). La razón z/T utilizada fue uno.
- 3) El equipo se prende a la velocidad deseada y se deja funcionar durante el tiempo un tiempo determinado, en este caso fue de dos horas y media.
- 4) Al término del proceso el equipo debe apagarse y desconectarse.
- 5) El suelo lavado se deja asentar durante dos horas, para posteriormente retirar el agua sucia y colocar la muestra de suelo en paltos de cartón, el suelo se mantendrá así al aire libre durante una semana para que se seque.
- 6) Al suelo ya seco se le determina la humedad y posteriormente el contenido de TPH.
- 7) Se calcula el porcentaje de remoción obtenido en la prueba de lavado mediante la fórmula:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{ppm de TPH iniciales} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) - \text{ppm de TPH después del lavado} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}{\text{ppm de TPH iniciales} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)} \times 100$$

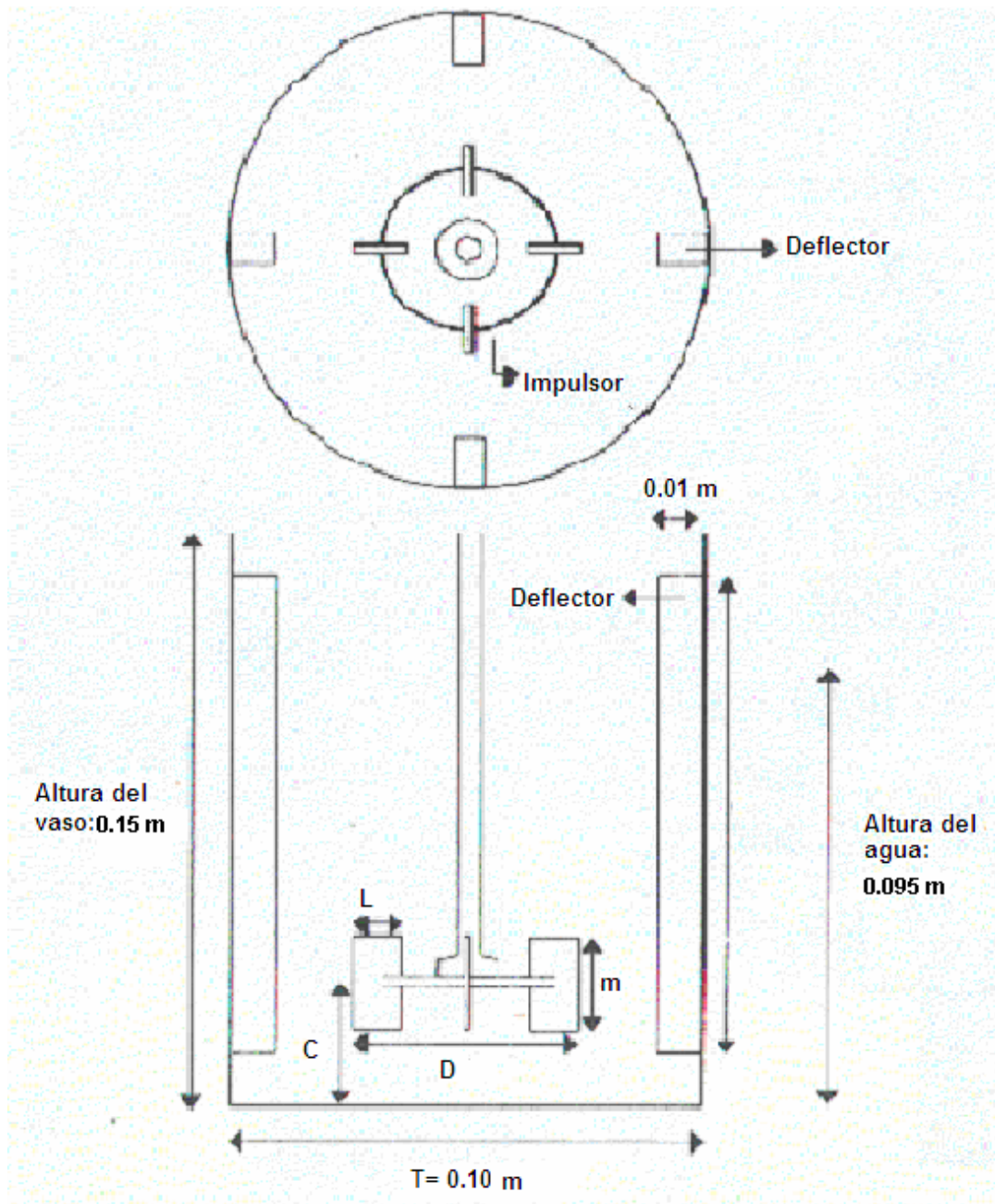


Figura 5.3. Tanque de lavado

Los impulsores se colocaron siempre a una altura de  $3/5$  del diámetro del impulsor, y la razón  $z/T$  del tanque fue prácticamente igual a uno.

#### 5.4.4.1. Determinación del error experimental

Para saber si las diferencias que se obtienen en los resultados entre una prueba se deben a la modificación de variables y se pueden comparar es importante determinar el error experimental, ya que en el caso de que sea muy grande, las diferencias pueden deberse a este y no al efecto de las variables.

Se efectuaron tres pruebas de lavado de suelo exactamente a las mismas condiciones, es decir, a nivel de tanque de un litro con 200 gramos de suelo y 600 mL de solución de SDS al 1%, en presencia de deflectores, a velocidad de 1308.4 rpm, con el impulsor de tres paletas planas, a la altura de 3/5 del diámetro del impulsor y durante dos horas y media de tiempo de lavado

Posteriormente se determinó el % de remoción de TPH de cada prueba y se estableció el error experimental.

#### Cálculos

$$X' = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

$$E_i = \frac{|X' - X_i|}{X'} * 100$$

$$D = \sqrt{\frac{(X_1 - X')^2 + (X_2 - X')^2 + (X_3 - X')^2}{2}}$$

Donde :

$X'$  = Media

$D$  = Desviación Es tan dar

$X_1, X_2, X_3$  = porcentaje de remoción para la prueba 1, 2 y 3 respectivamente

$E_i = E_1$  o  $E_2$  o  $E_3$  = Error experimental porcentual para la prueba 1 o 2 o 3.

$X_i = X_1$  o  $X_2$  o  $X_3$



#### **5.4.4.2. Efecto de las variables en el porcentaje de remoción de hidrocarburos**

Se llevaran a cabo pruebas de lavado de suelo a nivel de tanque de un litro con 200 gramos de suelo y 600 mL de solución de SDS al 1% manteniendo constantes las variables de tiempo (2.5 horas), altura del impulsor y la presencia de deflectores. El equipo que se utilizó fue el agitador de flecha Cole-Parmer-Instruments.

Las variables modificadas fueron el tipo de impulsor y las velocidades. Los impulsores utilizados fueron turbina Rushton, el tres paletas planas y cuatro paletas inclinadas, sus dibujos y especificaciones se muestran en la tabla 5.1. Para cada uno de ellos se realizaron pruebas para las velocidades de 762 rpm, 944 rpm, 1053 rpm, 1126 rpm, 1181 rpm, 1235 rpm y 1308 rpm.

A todas las pruebas se les determinó el porcentaje de remoción de hidrocarburos con la técnica explicada anteriormente.

Se realizó también una prueba de lavado en ausencia de deflectores utilizando el impulsor Rushton, a la velocidad 0, a la altura de un impulsor, 2.5 horas de tiempo y lavando 200 g de suelo con 600 mL de solución de SDS al 1%.

#### **5.4.4.3. Efecto de las variables en el consumo de potencia**

Se llevaran a cabo pruebas de lavado de suelo a nivel de tanque de un litro con 200 gramos de suelo y 600 mL de solución de SDS al 1% manteniendo constantes las variables de tiempo (2.5 horas), altura del impulsor y la presencia de deflectores. En este caso se usó un agitador de flecha que mide la potencia consumida y el torque a cada momento (LIGTHNIN).

Las variables modificadas fueron el tipo de impulsor y las velocidades. Los impulsores utilizados fueron turbina Rushton, el tres paletas planas y cuatro paletas

inclinadas. Para cada uno de ellos se realizaron pruebas a cinco velocidades diferentes que fueron: 762 rpm, 944 rpm, 1053 rpm, 1126 rpm, 1235 rpm y 1308 rpm.

Durante el transcurso de cada prueba cada cierto intervalo de tiempo se fue anotando el valor que daba el equipo (LIGHNIN) para así obtener el comportamiento de la potencia a lo largo del tiempo.

#### **5.4.4.4. Cinética de Lavado**

La cinética de lavado se llevó a cabo para observar el comportamiento de la operación con respecto al tiempo, así como para determinar la temporalidad de los lavados posteriores de manera que los efectos de las variables que se cambiaron fueran visibles.

Las pruebas fueron realizadas con el agitador de flecha (Cole-Parmer-Instruments) y según el procedimiento general para las pruebas de lavado pero con la diferencia de que se realizaron en un tiempo de cinco horas y durante todo el transcurso del proceso se fueron tomando muestras del agua de lavado con la ayuda de una jeringa de 5 mL.

Estas muestras se colocaron en tubos de ensaye, se dejaron asentar por media hora para posteriormente realizar diluciones de uno en cien. A estas soluciones finales se les midió la turbidez en unidades de absorbancia por medio de un espectrofotómetro (Milton Roy Spectronic 20D).

#### **Absorbancia**

Cuando un haz de luz con cierta intensidad ( $I_0$ ) atraviesa una muestra de solución esta absorbe parte de la radiación incidente, de manera que el haz es atenuado y transmitido con una menor intensidad ( $I$ ) (Skoog,2004).

La transmitancia es una medida de la fracción de intensidad de luz incidente transmitida por la muestra y la absorbancia de la fracción absorbida:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad \text{o expresada en porcentaje} \quad \%T = \frac{I}{I_0} * 100$$

$$A = -\log T \quad \text{o bien:} \quad A = \log \frac{I_0}{I}$$

Donde:

T es la transmitancia

A es la absorbancia

I es la intensidad de luz transmitida

$I_0$  es la intensidad de luz incidente

El medir la absorbancia de una solución nos permite determinar o comparar, como en el caso del presente trabajo, la concentración de la especie absorbente en la misma, esto lo expone la ley Lambert-Beer que establece una relación lineal entre la absorbancia de una solución y su concentración (Skoog,2004):

Donde:

$$A = \alpha * l * c$$

A: absorbancia

$\alpha$ : coeficiente de absorción o de absorbancia molar de la solución

l: longitud del cuerpo que la luz atraviesa

c: concentración de la especie absorbente

La medición se efectúa por medio de un espectrofotómetro, cuyo funcionamiento consiste en iluminar la muestra de solución (contenida en una celda) y medir la cantidad de luz dispersada en cierto intervalo de longitud de onda. Los resultados arrojados por este aparato son relativos ya que son en base a un blanco pero las concentraciones se pueden calcular al realizar una curva de calibración o bien pueden ser resultados comparativos.

## Procedimiento

Para realizar las mediciones de absorbancia se utilizó un espectrofotómetro y celdas de Milton Roy Company.

Para lograr medir la absorbancia, después de haber prendido el espectrofotómetro, es necesario primero ajustar la escala de cero a cien en la transmitancia por medio de

un blanco (agua destilada) y después cambiar el modo de lectura a absorbancia. La celda donde se va a colocar la solución a la que se le va a tomar la lectura debe ser enjuagada antes con la misma solución y después llenada con esta. Entonces se mete la celda al espectrofotómetro y después de esperar unos segundos para que se estabilice el equipo se puede tomar la lectura. Al terminar de leer la absorbancia para todas las soluciones el equipo se apaga y se desconecta.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Características del Suelo de Tabasco

Para llevar a cabo la caracterización del suelo se determinaron algunos de los parámetros más importantes de un suelo:

- Granulometría (% de grava, arena, arcilla y limo)
- Textura
- Carbón, Nitrógeno e Hidrógeno Totales
- Contenido de agua (Humedad)
- Conductividad Eléctrica
- pH
- Densidad
- Contenido de Calcio, Potasio, Sodio y Magnesio
- Contenido de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)

Al llegar el suelo al laboratorio del Instituto de Ingeniería este se dejó secar al aire libre durante varias semanas y, después de haber eliminado manualmente las piedras, se observó que las partículas de un tamaño mayor a 6.3 mm eran solo pequeños aglomerados de petróleo por lo que se decidió retirarlas. Toda la muestra fue tamizada y homogeneizada, se pasó por una malla  $\frac{1}{4}$  (MONTINOX), de 6.3mm de abertura.

#### Granulometría

La granulometría permite determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de suelo según su tamaño. Se realizó el análisis granulométrico del suelo utilizando las mallas  $\frac{1}{4}$ , 4, 6, 10, 20, 40, 60, 80 y 100. Con esta técnica se determinó la distribución de las partículas del suelo según su tamaño (Figura 6.1.) y se elaboró la curva de distribución de los tamaños de partícula del suelo (Figura 6.2.).

En la literatura encontramos que las partículas que tienen un tamaño de 2 a 64 mm se clasifican como grava, y las que son de 0.02 a 2 mm como arena (Tabla 6.1). En las figuras anteriores observamos que la muestra de suelo de Tabasco está conformada por partículas que van de 0.14 mm a 5.52 mm, por lo podemos decir que prácticamente está conformado por grava y arena. Con la curva de distribución de tamaños que se elaboró se tiene que el 38 % del suelo es grava y el 62 % es arena. (Figura 6.3.).

Tabla 6.1 Clasificación de los tamaños de partícula del suelo

grava	64 - 2 mm
arena gruesa	2 - 0.2 mm
arena fina	0.2 - 0.02 mm
limo	0.02 - 0.002 mm
arcilla	< 0.002

**Distribución del tamaño de las partículas de suelo**

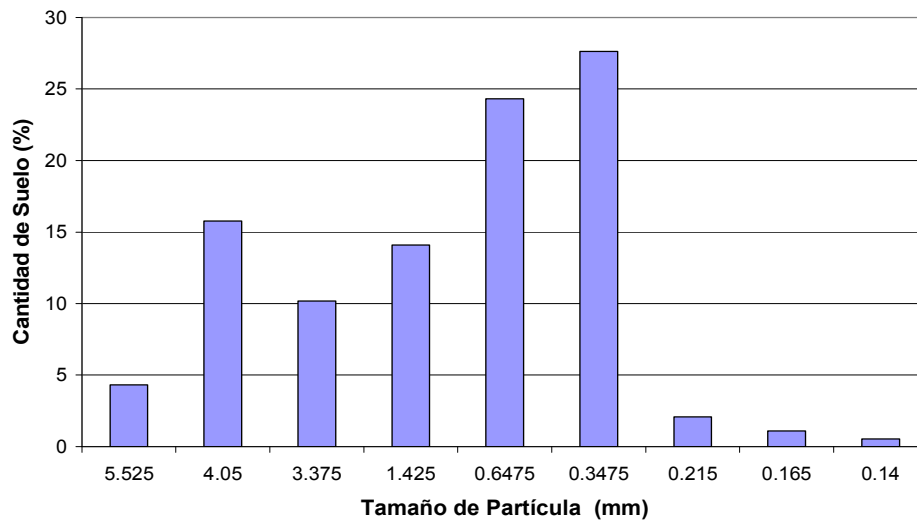


Figura 6.1. Distribución del tamaño de las partículas en el suelo

**Curva de Distribución de los Tamaños de Partícula del Suelo**

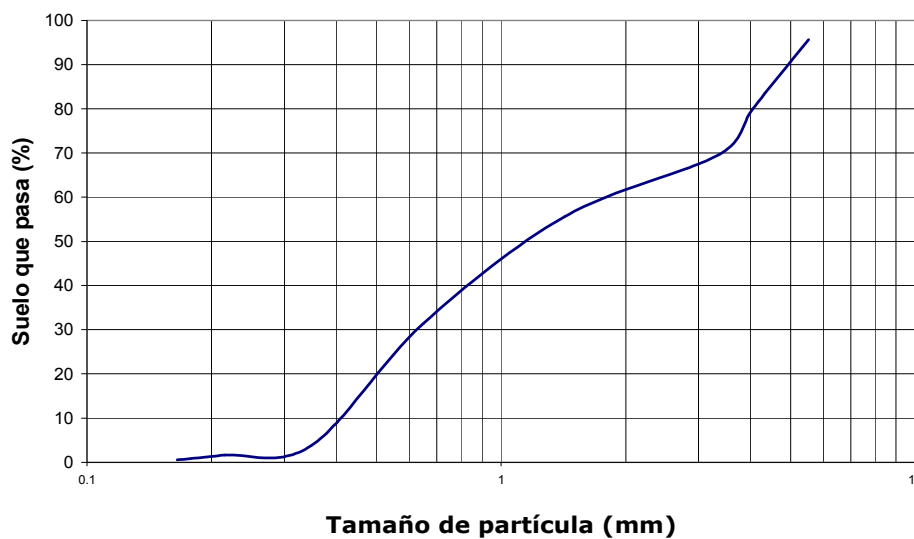


Figura 6.2. Curva de distribución de suelo contaminado con hidrocarburos

Esta característica del suelo favorecerá el proceso de lavado ya que como López (2004) lo menciona, cuanto mayor sea el porcentaje de arena gruesa y grava en el material a tratar más eficiente será el lavado del suelo en función del costo, ya que cuando el suelo contiene una gran cantidad de limo y arcilla los contaminantes se unen más fácilmente al suelo y por lo tanto son más difíciles de separar.

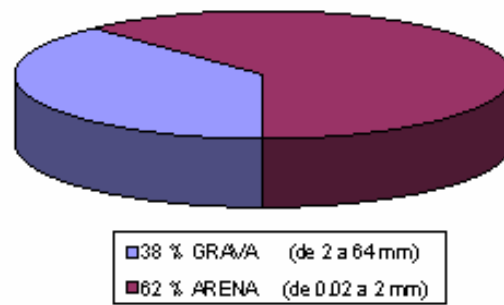


Figura 6.3. Tipos de Suelos Presentes

## Textura

Se denominan elementos gruesos a las partículas de tierra que no pueden pasar a través de un tamiz de abertura de 2 mm, y elementos finos a los que si pasan la abertura de este tamiz. La determinación de textura se realiza únicamente con los elementos finos (la grava no se toma en cuenta) y dependiendo del contenido de arena, limo y arcilla que se tenga se ve que clase de suelo es (Tabla 6.2). Por lo tanto nuestro suelo es arenoso, ya que como observamos en la Figura 6.1 prácticamente no contiene limo ni arcilla.

Tabla 6.2 Clase de suelo según el contenido de arena, limo y arcilla. (Mirsal, 2004)

CLASE DE SUELO	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)
Arenoso	86 - 100	0 - 15	0 - 15
Franco-arenoso	51 - 85	0 - 55	0 - 20
Franco-limoso	0 - 50	50 - 100	0 - 20
Franco	30 - 50	50	0 - 20
Franco-arcillo-limoso	0 - 30	50 - 80	20 - 30
Franco-arcillo-arenoso	50 - 80	0 - 30	20 - 30
Franco-arcilloso	20 - 50	20 - 50	20 - 30
Arcillo-limoso	0 - 20	50 - 70	30 - 50
Arcillo-arenoso	50 - 70	0 - 20	30 - 50
Arcilloso	0 - 50	0 - 50	30 - 100

En tabla 6.3. se muestran algunos de los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo realizados por los laboratorios ABC. Estos resultados corresponden a un muestreo realizado de manera in situ en Tabasco, por lo que el punto A y B se refieren a dos puntos diferentes de muestreo. Es necesario hacer notar que estas determinaciones se realizaron antes de que el suelo tuviera una preparación previa.

*Tabla 6.3. Características fisicoquímicas del suelo*

<b>Parámetro</b>	<b>Punto A</b>	<b>Punto B</b>
Carbón Total (%)	8.12	7.79
Hidrógeno Total (%)	0.96	0.78
Nitrógeno Total (%)	0.31	0.39
Contenido de Agua (%)	25.5	35.7
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	126	126
pH (unidades)	5.73	5.58
Densidad Real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.569	2.569

### **Nitrógeno Total**

En la literatura encontramos las interpretaciones para los valores de Nitrógeno en el suelo (Contreras, 2007), en base a esto podemos decir que tenemos muy alto contenido de Nitrógeno en nuestro suelo ya que tenemos entre 0.31 y 0.39 % .

% N	INTERPRETACIÓN
0.01 - 0.05	Muy bajo
0.06 - 0.1	Bajo
0.11 - 0.2	Normal
0.21 - 0.31	Alto
0.32 - 9.99	Muy alto

El nitrógeno es importante en los suelos ya que es un nutriente, estimula el crecimiento de los cultivos y de las plantas. Es fundamental para la formación de la clorofila y como componente de las proteínas.



### Conductividad eléctrica

En la literatura encontramos las interpretaciones para los valores de conductividad eléctrica en el suelo (Contreras, 2007), el suelo que tenemos es no salino ya que los valores de conductividad eléctrica son de 126  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y están por debajo de los 0.4 mS/cm.

CE 1:5 mS/cm	CLASIFICACIÓN
<0.4	No salino
0.4 - 1.15	Ligeramente salino
> 1.15	Salino

### pH

En la literatura encontramos las interpretaciones para los valores de pH en el suelo (Contreras, 2007). Se trata de un suelo ácido, ya que se tiene un pH alrededor de 5.7 unidades.

pH	CLASIFICACIÓN
0.01 - 5.59	Muy ácido
5.6 - 6.59	Ácido
6.6 - 7.59	Neutro
7.6 - 8.59	Alcalino
8.6 - 9.99	Muy alcalino

### Contenido de Calcio, Potasio, Sodio y Magnesio

A este suelo ya preparado se le mandó a hacer la determinación de Calcio Potasio, Sodio y Magnesio, que fue realizada por los laboratorios ABC, por medio de la técnica de Digestión Ácida- ICP/AES respaldada por las normas americanas EPA 3051-1996 y EPA 6010B-1996. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.4.

*Tabla 6.4. Contenido de Calcio, Potasio, Sodio y Magnesio en el suelo*

Compuesto	mg/kg
Calcio (Ca)	21353
Potasio (K)	4616
Magnesio (Mg)	340
Sodio (Na)	15928

Las características de el suelo de Tabasco con el que se trabajo se comparan el la tabla que se encuentra a continuación (Tabla 6.5.) con un suelo para cultivo, proveniente de Villalbilla de Burgos, ubicado en el pueblo de Burgos en Castilla y León, España (Contreras, 2007). Aunque el suelo no es de México se eligió para llevar a cabo la comparación debido a la gran cantidad de parámetros caracterizados, ya que en otras fuentes se reportan pocos datos.

Observamos que los suelos son bastante diferentes, para empezar el de la zona de cultivo tiene un gran contenido de limo y una buena parte de arcilla, lo que lo hace un suelo Franco, estos suelos retienen bien el agua y los abonos y permite a las plantas tomar nutrientes de la disolución de l suelo, son los más apropiados para cultivos, los suelos arenosos como el de nuestro trabajo retienen pocos elementos nutrientes, son suelos algo más pobres y desprenden fácilmente el agua.

También vemos que varían mucho los pH, la salinidad del suelo y la Humedad.

Tabla 6.5. Características del suelo de tabasco y de un suelo dedicado al cultivo.

<b>Parámetro</b>	<b>Suelo de Huimanguillo, Tabasco, México (campo Cinco Presidentes)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Suelo de cultivo de Villalbilla de Burgos, Castilla y León, España</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Porcentaje de elementos finos y gruesos</b>	Finos: 62%		Finos: 65.24%	
	Gruesos: 38%		Gruesos: 34.76%	
<b>Textura</b>	Arena: practicamente 100%	Suelo de tipo Arenoso	Arena: 34.23% Limo: 49.64 % Arcilla: 16.09 %	Suelo tipo Franco
<b>Calcio</b>	21353 mg/kg		480800 mg/kg	
<b>Magnesio</b>	340 mg/kg		58360 mg/kg	
<b>pH</b>	5.7	Tierra Ácida	8.1	Tierra Alcalina
<b>Conductividad Eléctrica</b>	0.0126 mS/cm	Suelo no Salino	0.62 mS/cm	Suelo Ligeramente Salino
<b>Nitrógeno Total</b>	0.31 a 0.39 %	Contenido Muy Alto	0.04%	Contenido Muy Alto
<b>Humedad</b>	25 a 35 %		19.84%	

## Contenido de Metales Pesados

Para cada intervalo de tamaño obtenido de la granulometría realizada anteriormente, es decir para el suelo retenido en cada malla, se determinó el contenido de algunos metales pesados (Tabla 6.6.), esto último fue realizado por los laboratorios ABC, por medio de la técnica de Digestión Ácida- ICP/AES respaldada por las normas americanas EPA 3051-1996 y EPA 6010B-1996.

En los resultados se observa que el Cd no fue identificado en ninguna de las muestras. En cuanto al resto de los metales, parece no haber un patrón claro de distribución, mientras que el Cd se presentó en mayor concentración en la malla 40, el Cr lo hizo en la malla 100, el Ni y el V en la malla 10 y el Zn lo hizo en la malla 80. Por otro lado, la mayor parte de los metales estudiados, se encontraron en menor concentración en la malla 60, con excepción del Ni, que lo hizo en la malla 6.

Tabla 6.6. Metales Presentes en las diferentes Mallas del Suelo de Tabasco

Metal	Contenido (mg/kg) en						
	malla 6	malla 10	malla 20	malla 40	malla 60	malla 80	malla 100
Cadmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cobre	1.475	2.358	3.029	3.283	0.627	2.469	1.571
Cromo	4.768	3.087	3.749	3.01	2.543	4.402	9.961
Níquel	1.291	15.911	11.478	6.416	3.846	5.423	7.9
Vanadio	34.383	35.909	28.303	17.799	10.707	15.674	29.68
Zinc	31.591	36.762	32.154	21.826	19.2	48.38	45.344

## Contenido de los Hidrocarburos Totales del Petróleo

Se determinó el contenido de HTPs para cada fracción de tamaño de partícula obtenida en la granulometría. En cuanto a la distribución de los HTPs en las mallas 4 a la 100, que se muestra en la figura 6.4., se puede observar la tendencia de que entre menor es el diámetro de la partícula, menor es la concentración de los HTPs, hasta llegar a la malla 80 donde se encuentra el mínimo de la concentración (66,499 mg/kg), para subir ligeramente a 78,642 mg/kg en la malla 100. La mayor concentración de HTPs se encontró en la malla 4, con un valor de 293,104 mg/kg.

En general observamos que la contaminación del suelo es bastante alta, a partir de los resultados obtenidos de la concentración de HTPs en cada fracción de tamaño de partícula se calculó la contaminación total del suelo, la cual resultó ser de:

**150, 671 mg/kg.**

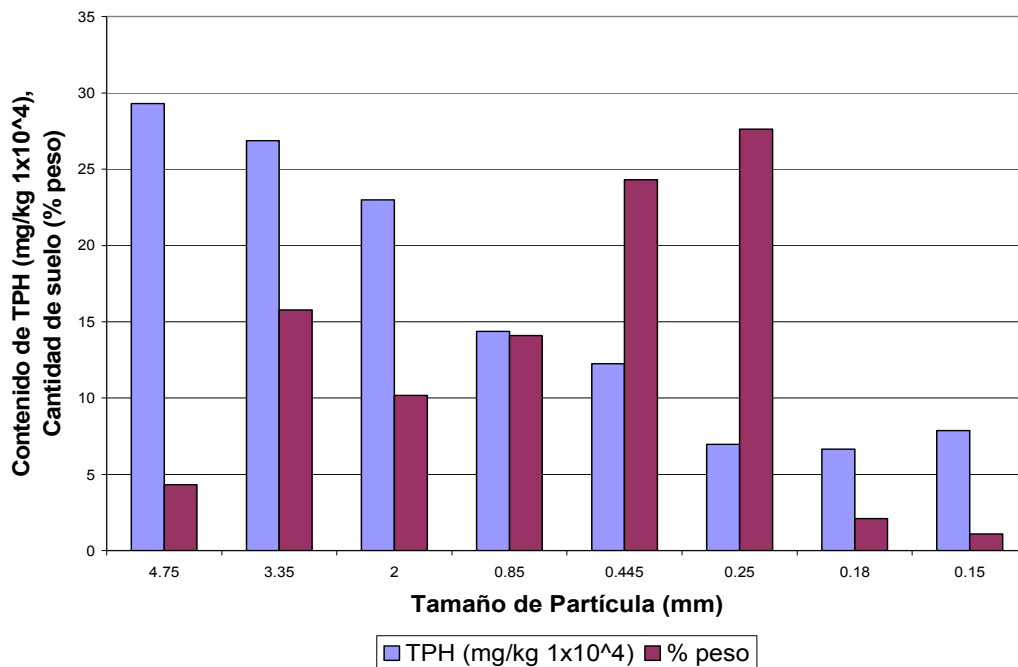


Figura 6.4. Concentración de HTPs en las distintas fracciones de suelo

## 6.2. Elección del Surfactante

Para elegir el surfactante a usar en las pruebas de mezclado se lavaron muestras de 6 gramos de suelo con 20 mL de solución de surfactante, se introdujeron dentro de pequeños viales y se agitaron durante 24 horas en un agitador de flecha y ya teniendo el suelo seco se le determinó el contenido de TPH. Esta técnica fue utilizada en trabajos anteriores (Torres et. al., 2003) donde se determinó que el error porcentual de la prueba era de alrededor del 3%. Para efectos de este trabajo se realizaron pruebas con los surfactantes que se muestran en la Tabla 6.7. donde también se exponen sus características.

Tabla 6.7. Características de los surfactantes utilizados

Surfactante	Nombre Químico	Naturaleza	Peso Molecular g/mol	CMC (mg/L)	HLB
Surfactol LO	Oxido de lauril miristil dimetil amina	No iónico (en condiciones neutras y alcalinas)	425	NR	NR
Tween 80	Monoleato de sorbitán Poe=20	No iónico	1308*	65.4*	15*
Brij 35	Lauril éter Poe=23	No iónico	1206*	39.6**	16.7*
Brij 58	Cétil éter Poe=20	No iónico	1122*	84.15 <sup>F</sup>	15.6*
Emulgin 600	Nonil fenol Poe=6	No iónico	483*	45.06*	11*
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	No iónico	660	49.5**	13.5*
Texapon 40	Lauril éter sulfato de sodio	Aniónico	442*	1,458*	4 <sup>Y</sup>
SDS	Dodecil sulfato de sodio	Aniónico	288.4*	400*	40*
Maranil Lab	Dodecil bencen sulfato de sodio	Aniónico	348*	1,392*	11.7 <sup>E</sup>
Surfactol G	NR	Aniónico	NR	NR	NR
Polafix CAPB	propil-cocoamida betaína	Zwitteriónico	359	100,400	NR

\* (Torres et al, 2005(A)), \*\* (Milton, 1989), <sup>E</sup> (Triller et al, 2003),  
<sup>F</sup> (Klammt et al, 2005), <sup>Y</sup> (www.unitopchemicals.com)

En la Figura 6.5. se muestran los resultados de las pruebas realizadas usando soluciones de surfactantes varios a una concentración de 0.5% p/v. Como se observa, la máxima remoción de hidrocarburos, como HTPs, lo obtuvo el Surfactol LO (28.34%), surfactante no iónico en condiciones neutras y alcalinas y que está basado en un grupo amino que hace que en condiciones ácidas tienda a protonarse y comportarse como un surfactante catiónico. En segundo lugar, resulta la remoción alcanzada por el Maranil Lab (26.71 %), que es un sodio dodecil sulfato bencilado (SDBS), de naturaleza aniónica. En tercer lugar destaca el Polafix CAPB (20.48 %), que es un surfactante zwitteriónico, esto es que presenta una carga positiva y una negativa en la cabeza hidrofílica.

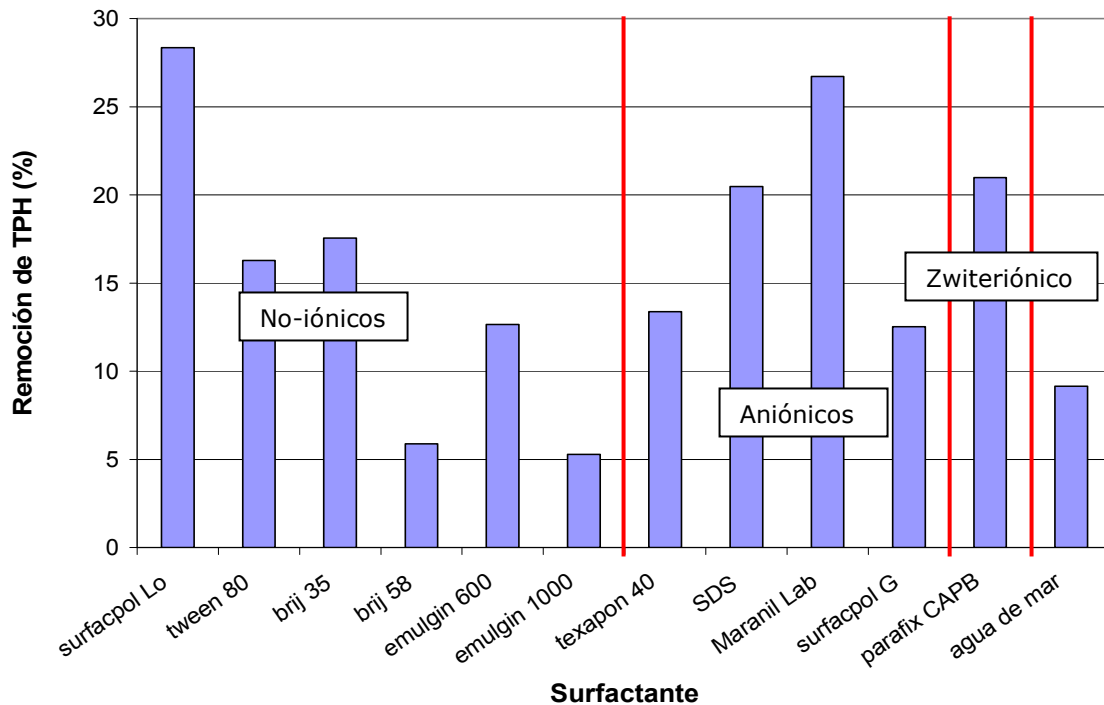


Figura 6.5. Resultados de las pruebas de lavado con un solo surfactante

La experiencia previa ha mostrado que al lavar algunos suelos contaminados con hidrocarburos, que presentan altos contenidos de Calcio y Magnesio, aún los surfactantes aniónicos son más empleados por su costo y buen desempeño. Ya que el Ca y Mg presentes atrapan a los monómeros cargados negativamente, se disminuye la capacidad de la dosis aplicada para resorber los compuestos de interés desde el suelo. Para resolver este problema se han empleado tres mecanismos muy sencillos: a) agregar una sal de sodio (Na) a la solución de lavado, b) adicionar un atrapador de calcio (Ca) como el silicato de sodio o zeolita en polvo y c) usar combinaciones de surfactante iónico-no iónico.

Es por esto que se realizaron pruebas de surfactantes aniónicos con una sal, con silicato de sodio, mezclas de surfactante iónico con no iónico y también se realizó una prueba aumentando la concentración de SDS al 1 %.

Los resultados obtenidos, que se muestran en la Figura 6.6. dejan ver que las pruebas con SDS a una concentración mayor (1%) arrojaron mejores resultados que

los obtenidos anteriormente (35.47 % de remoción de HTPs). Las pruebas de SDS con NaCl al 1 y 3 % mostraron una mejora con respecto a la prueba de SDS solo (0.5%) en tan solo un 3 y 4 % adicional, pero no mejoraron el resultado obtenido con SDS al 1%. Las pruebas realizadas con SDS y NaSi al 5 y 7 % aumentaron la remoción de TPHs, en un 29 y un 25% respectivamente. La mezcla de SDS y TW 80 no resultó muy adecuada, pues se obtuvo una remoción total del 17.5 %. En las pruebas donde se utilizó el surfactante Maranil Lab se observa que también donde se agrega el silicato de sodio se obtiene la remoción más alta, de más de 40%.

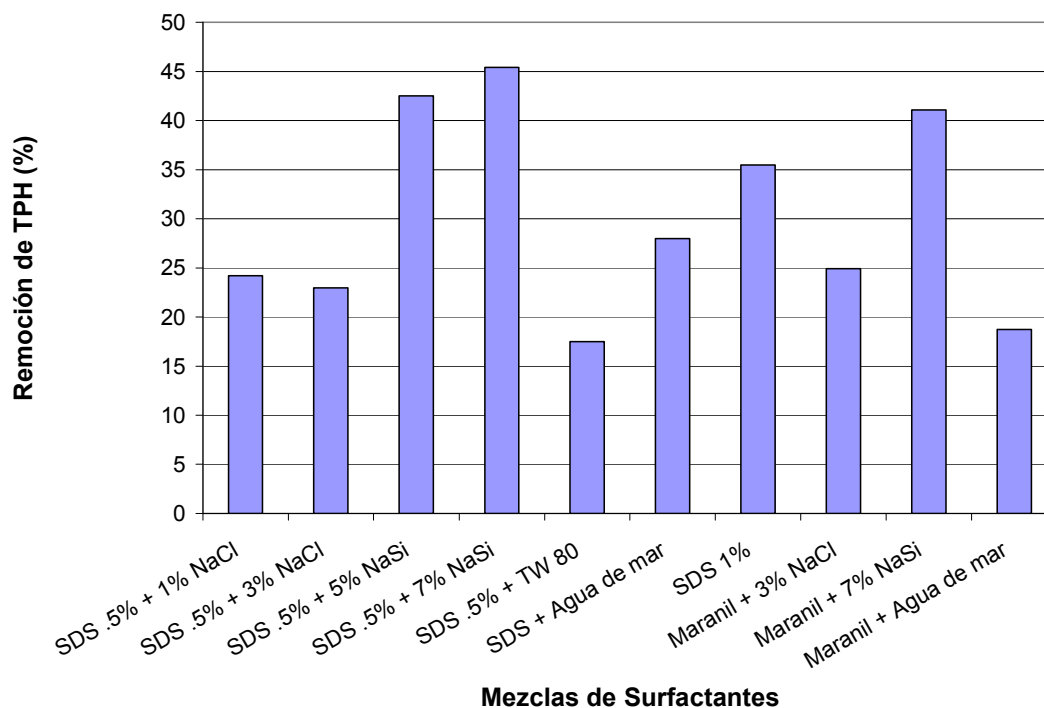


Figura 6.6. Resultados de las pruebas de lavado con surfactante y sal o mezclas de surfactantes.

De los resultados obtenidos se vió que las remociones mas altas se consiguieron con la mezcla de surfactante y sal, sin embargo el añadir sal a la solución puede causar otros problemas posteriores, ya que aumenta la salinidad del suelo y del agua de lavado, que probablemente tenga que ser después retirada, además de que incrementa los costos, es por esto que se eligió el surfactante SDS al 1% ya que no causa estos problemas, el costo es bajo y también se obtuvo una remoción buena (35.47%).

### 6.3. Cinética de lavado

Se realizaron pruebas de cinética de lavado para cuatro impulsores diferentes, dos de los cuales son de flujo radial (Rushton y 3 Paletas Planas) y dos son de flujo axial (4 Paletas Inclínadas y Propela Marina) y a una velocidad alta (1181 rpm), se tomó el valor de la absorbancia del agua de lavado cada cierto tiempo y los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la Figura 6.7.

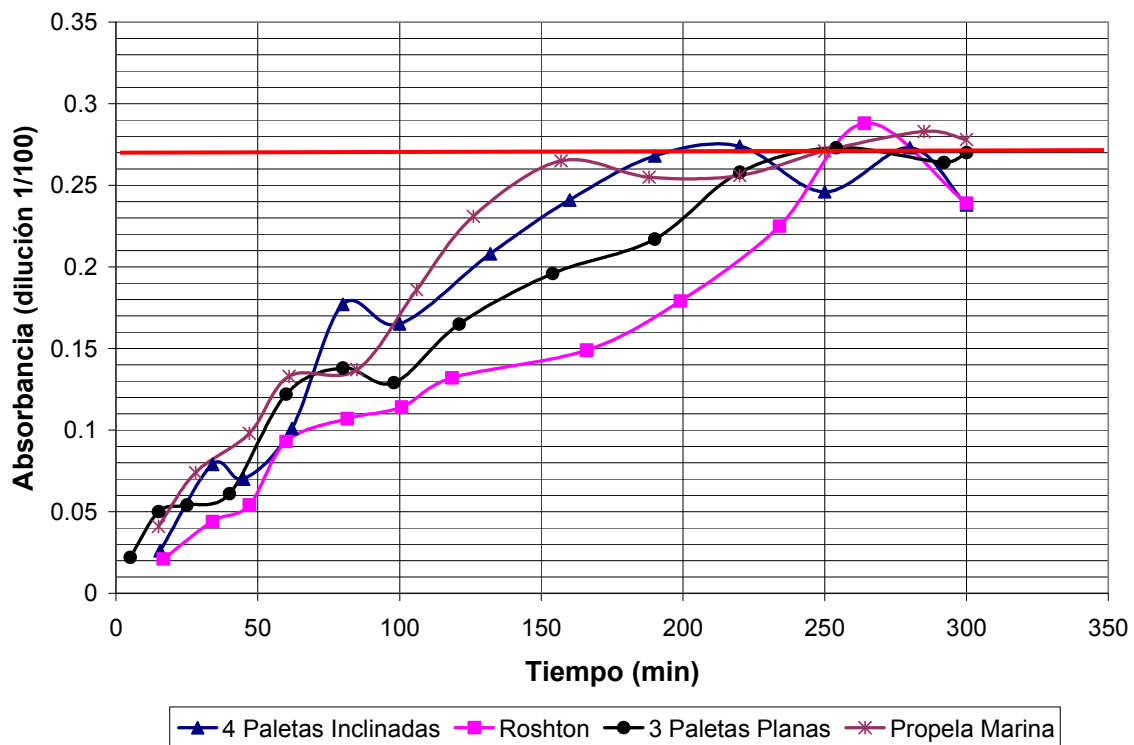


Figura 6.7. Cinéticas del proceso de lavado de suelos a una velocidad de 1181 rpm.

El medir la absorbancia de una solución nos permite determinar o comparar, como en el caso del presente trabajo, la concentración de la especie absorbente en la misma, por lo que podemos decir que entre mayor sea la absorbancia hay una mayor cantidad de hidrocarburo en la solución.

En las gráficas se puede observar que para todos los impulsores existe como tendencia general un aumento en la absorbancia conforme transcurre el tiempo de



lavado, esto quiere decir que conforme pasa el tiempo en el proceso el hidrocarburo se va disolviendo en la solución de surfactante.

Sin embargo después de cierto tiempo las gráficas muestran que se llega a un equilibrio, la turbidez del agua no aumenta, por lo tanto ya no hay una remoción significativa del contaminante del suelo. Esto es importante ya que quiere decir que el proceso tiene un límite, no porque lo dejemos mucho más tiempo seguirá habiendo mas remoción del contaminante. Esta limitación probablemente esté dada por la solución de lavado. Es probable que la gran mayoría del surfactante contenido ya se encuentre "ocupado" por lo que por más tiempo y energía que metamos en el proceso ya no será capaz de alcanzar mayores remociones.

Esta suposición se reafirma al ver que todos los impulsores al parecer llegan a un mismo punto de equilibrio que se encuentra entre un 0.26 y un 0.27 de absorbancia (dilución 1/100), por lo que podemos decir que este punto de equilibrio es independiente del tipo de impulsor que se use y probablemente de todas las variables de operación involucradas. Sin embargo no todos los impulsores permiten llegar igual de rápido a este punto de equilibrio, para algunos toma más tiempo y esto lo veremos más claramente en las gráficas siguientes (Figura 6.8.).

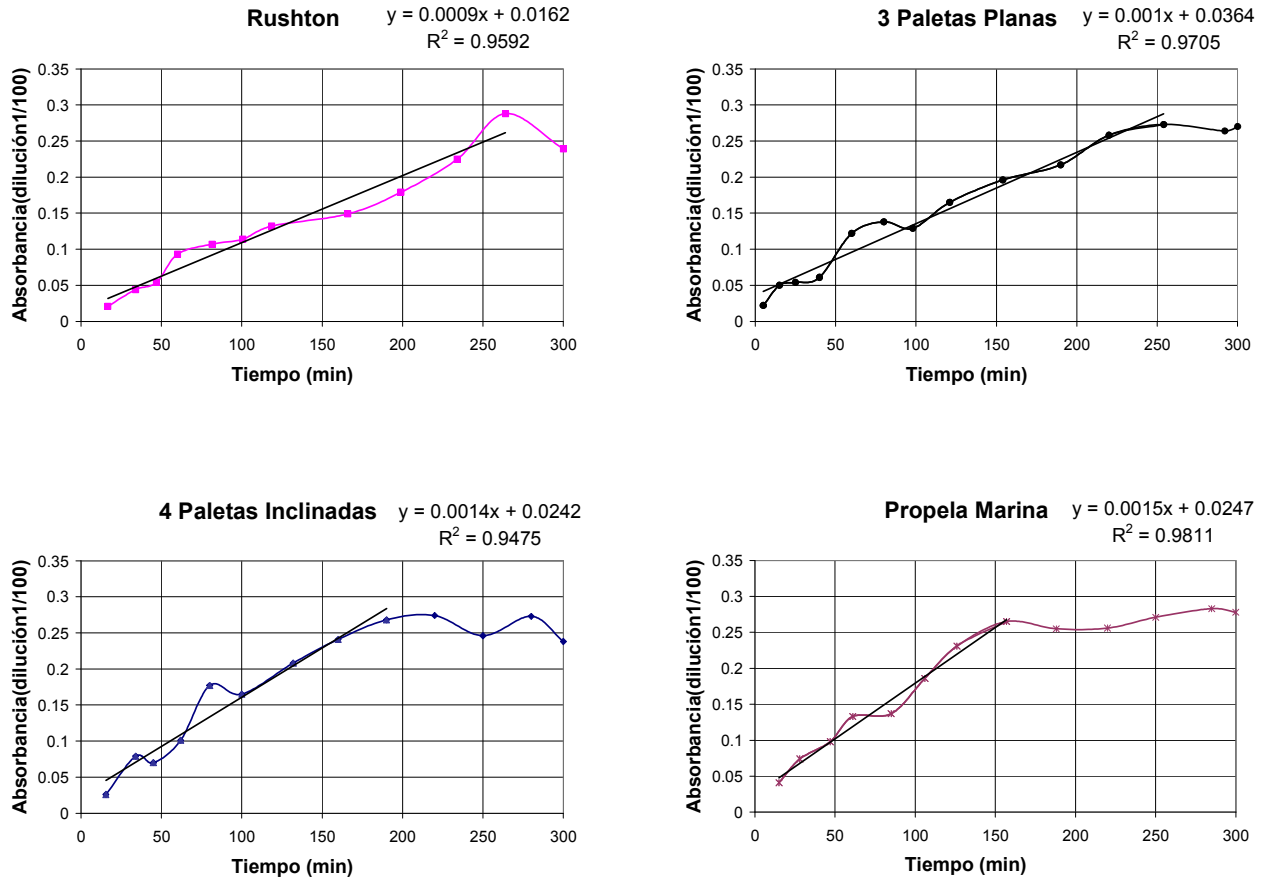


Figura 6.8. Cinéticas de Lavado.

Para los impulsores de flujo radial se obtuvo que la prueba realizada con Rushton presentó una pendiente en la gráfica de absorbancia vs tiempo, de 0.0009 (A/min), y llegó al equilibrio alrededor de los 260 minutos y la de 3 Paletas Planas tuvo una pendiente de 0.001 (A/min) y necesitó un tiempo de 240 minutos para llegar al equilibrio.

Los impulsores de flujo axial por su parte tuvieron una pendiente mayor, de 0.0014 y 0.0015 (A/min) para el de 4 Paletas Inclinadas y el de Propela Marina respectivamente. El tiempo en el que llegaron al equilibrio fue menor con respecto a los de flujo radial, la prueba realizada con el impulsor de 4 Paletas Inclinadas llegó en alrededor de 190 minutos y la prueba en la que se usó el impulsor Propela Marina tardó aproximadamente 160 minutos para alcanzar el equilibrio.

En general observamos que los impulsores de flujo axial, al tener una pendiente más pronunciada permiten, para un determinado tiempo de operación remover una mayor cantidad de hidrocarburo del suelo, y por lo tanto llevar a cabo el proceso de lavado en un tiempo menor.

De los cuatro impulsores estudiados el que tuvo mejores resultados fue la Propela Marina que llegó al equilibrio en un tiempo de alrededor de 160 minutos, sin embargo durante las pruebas de cinética de lavado se tuvieron muchos problemas con este impulsor ya que provocaba que se formara una gran cantidad de espuma que comenzaba a escurrirse. Fue por las grandes complicaciones y el tiempo que tomo lograr realizar la prueba con éxito que se decidió no usar este impulsor para las pruebas subsecuentes.

El impulsor que obtuvo en segundo lugar los mejores resultados fue el de 4 Paletas Inclinadas el cual tardo aproximadamente 190 minutos en llegar al equilibrio. La prueba que resultó peor de todas fue la realizada con el impulsor Rushton, tardando alrededor de 260 minutos en llegar al equilibrio.

Además de el estudio de la cinética de lavado otro objetivo de la prueba era el de determinar el tiempo de lavado en el que se realizarían las pruebas subsecuentes. Para observar el efecto que tienen el cambio de las variables sobre la remoción de TPH, era necesario el tiempo de lavado aun no permitiera que se llegara a este equilibrio porque si no para todos los casos obtendríamos resultados semejantes. Por esto fue que se eligió desde un principio realizar esta prueba a una velocidad alta, y el tiempo en que se decidió realizar las siguientes pruebas fue de dos horas y media, es decir de 150 minutos, que como vemos en la gráfica aún no se alcanza el equilibrio en ese tiempo.

#### 6.4. Repetibilidad de la medición de la remoción de hidrocarburos.

Con el fin de obtener el error que puede existir en la experimentación del proceso de lavado del suelo y determinar si la técnica es viable para observar el efecto de el tipo de impulsor y velocidad de agitación, se realizaron tres pruebas a las mismas condiciones de operación, se utilizó el impulsor de tres paletas inclinadas y se trabajó con una velocidad de 1308 rpm. Con los resultados obtenidos se calculó la media y la desviación estándar para posteriormente obtener el error porcentual de cada prueba. Los resultados se muestran en las tablas 6.8. y 6.9.

Tabla 6.8. Media y desviación estandar de las pruebas de lavado

	<b>Remoción (%)</b>
<b>Media</b>	<b>63.52750037</b>
<b>Desviación Estandar</b>	<b>1.545558095</b>

Tabla 6.9. Error porcentual de las pruebas de lavado.

<b>Prueba</b>	<b>% remoción</b>	<b>Concentración final de HTPs (mg/kg)</b>	<b>Remoción (%)</b>	<b>Error porcentual</b>
1	62.695	56208	62.695	1.31
2	65.311	52267	65.311	2.81
3	62.577	56386	62.577	1.50

Se puede decir que el error porcentual es bastante pequeño por lo que el método y la experimentación subsecuente nos permitirá observar el efecto que tienen las variables sobre el proceso de lavado.

## 6.5. Determinación de la velocidad mínima de suspensión de sólidos

La determinación de la velocidad mínima de suspensión de sólidos ( $N_{js}$ ) se realizó de manera teórica con ecuaciones encontradas en la literatura (Armenante et al, 1998 (B)) y de manera experimental.

La ecuación de Armenante para estimar la  $N_{js}$  es la siguiente:

$$N_{js} = 3.06 \left( \frac{T}{D} \right)^{1.33} \exp \left( 0.44 \frac{C_b}{T} \right) D^{-0.63} x^{0.13} d_p^{0.02} v^{0.1} \left( \frac{g\Delta\rho}{\rho_L} \right)^{0.45}$$

Para el sistema manejado en este trabajo las diferentes partes integrantes de la ecuación tienen el siguiente valor (las unidades son las que pide la ecuación).

Tabla 6.10. Valores para la ecuación de Armenante

Símbolo	Significado	Valor	Unidades
T	diámetro del tanque	0.105	m
D	diámetro del impulsor	0.05	m
C <sub>b</sub>	distancia del límite inferior del impulsor al fondo del tanque	0.025	m
X	porcentaje en peso de sólidos	25	g/g
d <sub>p</sub>	tamaño de partícula	1.682	mm
v	viscosidad cinemática del líquido	1E-06	m <sup>2</sup> /s
g	constante gravitacional,	9.81	m/s <sup>2</sup>
Δp	diferencia de densidades entre el sólido y el líquido	1569	kg/m <sup>2</sup>
ρ <sub>L</sub>	densidad del líquido	1000	kg/m <sup>3</sup>

Las determinaciones experimentales fueron visuales. Se realizaron colocando un espejo debajo de la base del tanque (vaso de precipitados de un litro). El agitador se hizo funcionar a diferentes velocidades con el fin de observar en que momento las

partículas sólidas ya no permanecían en el fondo del tanque. Las estimaciones obtenidas para cada impulsor de manera teórica y experimental son las siguientes:

*Tabla 6.11. Velocidad mínima para la suspensión total de sólidos teórica y experimental*

<b>Impulsor</b>	<b>Njs Experimental (rpm)</b>	<b>Njs Teórica (rpm)</b>
Rushton	710	5233
3 Paletas Planas	850	5233
4 Paletas Inclinas	670	5233

Como vemos la ecuación no fue útil para estimar la Njs ya que los valores dan muy por encima de la experimental (un orden de longitud) y además para los tres impulsores se obtiene el mismo valor, ya que no toma en cuenta el tipo de impulsor, solo su diámetro.

Otros factores tampoco se consideran en esta ecuación, como la presencia de deflectores, la posibilidad de que exista una distribución de tamaños de partícula diferente, ya que la ecuación está desarrollada para un solo tamaño de partícula y hasta la forma de la partícula cuyo efecto ha sido estudiado también (Takahashi, 1995)

En cuanto a los valores experimentales obtenidos, aunque no son exactos por el método de determinación utilizado, se acercan mucho a la realidad y nos dan una idea de donde se encuentra la velocidad mínima de agitación para suspender todo el suelo contenido en el tanque.

Observamos que el impulsor de flujo axial es el que necesita una menor velocidad para suspender todo el suelo (670 rpm), el que necesita una mayor velocidad es el impulsor de 3 Paletas Planas (850 rpm) que es de flujo radial. Este resultado ya era esperado debido a que en trabajos anteriores como el de Armenante et al. (1988, (A)) se reporta que, en general, los impulsores de flujo axial y mixto son más eficientes que los de flujo radial para lograr la completa suspensión de sólidos.

Sin embargo, en el mismo estudio, se expone que conforme disminuye la distancia entre el fondo del tanque y la base del impulsor la diferencia entre el desempeño de los impulsores se vuelve menos pronunciada.

## **6.6. Efecto de los deflectores en el proceso de lavado**

Aunque no se logró realizar ninguna medición de la remoción de hidrocarburos o de consumo de potencia sin el uso de los deflectores debido a que el contenido del tanque se derrama al comenzar la agitación debido al gran vortex que se forma, se debe remarcar que estos tienen un efecto muy importante en el proceso de lavado, ya que aumentan la turbulencia del sistema y evitan que se forme el vortex, el cual ocupa un espacio en el tanque que pudiera ocupar la mezcla de suelo y solución.

Otros trabajos donde se compararon los resultados con y sin el uso de deflectores en procesos de mezclado para la preparación de emulsiones (Torres et al, 2002) se reporta un mejor desempeño del proceso con el uso de deflectores.

## **6.7. Efecto de la velocidad de agitación y el tipo de impulsor en la remoción de hidrocarburos.**

Se llevaron a cabo pruebas de lavado donde se mantuvieron constantes las variables de tiempo (que se definió de 2.5 horas con las pruebas de cinética de lavado), altura del impulsor (3/5 del impulsor) y la presencia de deflectores, se modificaron las variables de velocidad de agitación y el tipo de impulsor, a cada prueba realizada se le determinó el porcentaje de hidrocarburos removidos y los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación en la Figura 6.9.

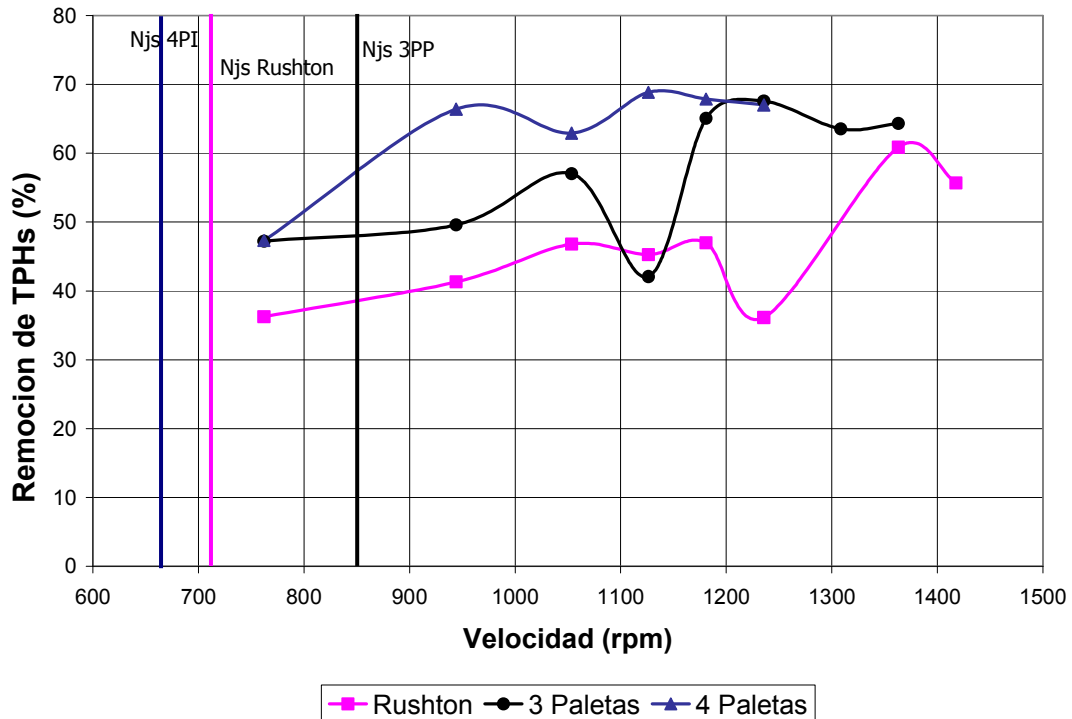


Figura 6.9. Remoción de TPHs en función de la velocidad de agitación.

En esta gráfica se puede observar que conforme aumenta la velocidad de agitación en general hay un aumento de la remoción de hidrocarburos. Existen zonas donde esta tendencia es distinta ya que con un aumento de la velocidad se obtiene una disminución muy pronunciada en la remoción de hidrocarburos, esto probablemente se debe a que a cierta velocidad se establecen patrones de flujo que no ayudan al proceso y a la remoción del contaminante.

En los tres casos ocurrió este fenómeno, y curiosamente después de esta disminución parece que se llega a una estabilización, aunque se aumente la velocidad ya no limpia más el suelo.

En este trabajo casi todas las pruebas se llevaron a cabo por encima de la velocidad mínima de agitación para completar la suspensión de sólidos, como se hace notar en la gráfica anterior mediante las líneas verticales. Los valores son de 670, 710 y 850 rpm para los impulsores de 4 Paletas Inclinadas, Rushton y 3 Paletas Planas respectivamente.



En la literatura generalmente se dice que no tiene caso trabajar por encima de esta velocidad (Armenante *et al*, 1997; Thanapalan, 1999), sin embargo encontramos que por encima de esta existe un aumento considerable en la remoción, lo que quiere decir que en este caso la energía que damos al proceso adicional a la que tendríamos que dar para solo mantener en suspensión todos los sólidos esta ayudando a lograr el proceso de lavado. Todas las pruebas se realizaron desde una velocidad de 762 rpm, para el impulsor Rushton en esta velocidad se obtuvo una remoción del 36% y a los 1400 rpm se removió alrededor del 58%. Por su parte los impulsores de 3 Paletas Planas y 4 Paletas Inclinadas a 762 rpm removieron el 47 %, el 3 Paletas Planas llegó a remover un 67% a los 1200 rpm y el de 4 Paletas Inclinadas alcanzó el mismo 67% a los 1120 rpm.

En la tabla 6.12. se observa que para el impulsor Rushton un aumento de 638 rpm significó aumentar la remoción en un 22% más, para el 3 Paletas Planas un aumento de 438 rpm se vió reflejado en el aumento de la remoción a un 20 % mas, el impulsor de 4 Paletas inclinadas también, para lograr el aumento de su remoción a un 20% más necesitó incrementar la velocidad 358 rpm.

Tabla 6.12. Cambio en la remoción al modificar la velocidad de agitación.

Impulsor	Vel. agitación (rpm)	Remoción (%)	Vel. agitación (rpm)	Remoción (%)	Diferencia de velocidades (rpm)	Diferencia de Remoción (%)
Rushton	762	36	1400	58	638	22
3 Paletas Planas	762	47	1200	67	438	20
4 Paletas Inclinadas	762	47	1120	67	358	20

Este último impulsor, el único de flujo axial fue el que alcanzó una mayor remoción de hidrocarburos en una menor velocidad, ya que para 1120 rpm ya tuvo un 67% del hidrocarburo removido, a diferencia del de 3 Paletas Planas que necesitó llegar a los 1200 rpm para conseguir este valor y el impulsor Rushton se quedó muy atrás ya que a los 1400 rpm tan solo obtuvo una remoción del 58%, para este impulsor se observa que probablemente no había llegado aún a una estabilidad, como dijimos anteriormente el límite de remoción está dado por otros factores que no son de operación o de

maquinaria, por lo que para llegar al 67% de remoción que alcanzaron los otros hubiera necesitado más tiempo.

## 6.8. Repetibilidad de la medición del consumo de potencia

Con el fin de garantizar que el equipo de agitación LIGHTNIN al operar a las mismas condiciones arroja los mismos valores de potencia, es decir, que sea preciso, se realizaron por duplicado mediciones del consumo de potencia al agitar agua en el tanque de trabajo (Figura 5.4.) utilizando los tres impulsores y a 18 velocidades de agitación. Los resultados y el promedio aritmético que se obtuvieron se muestran en la tabla 6.13.

Tabla 6.13. Duplicado de las pruebas de consumo de potencia en la agitación de agua.

Velocidad de agitación (rpm)	Impulsor Rushton.			3 Paletas Planas			4 Paletas Inclínadas		
	Potencia (W)		Promedio Aritmético	Potencia (W)		Promedio Aritmético	Potencia (W)		Promedio Aritmético
	Prueba No. 1	Prueba No. 2		No. 1	No. 2		No. 1	No. 2	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0
500	1	1	1	1	1	1	0	1	0.5
600	2	2	2	2	2	2	1	1	1
700	3	3	3	2	2	2	1	1	1
800	3	3	3	2	2	2	1	1	1
900	3	4	3.5	3	3	3	1	1	1
1000	4	4	4	3.5	3	3.25	1	1	1
1100	5	5	5	4	4	4	1	1	1
1200	6	6	6	6	6	6	2	2	2
1300	8	8	8	7	7.5	7.25	3	3	3
1400	10	10	10	9	9	9	5	5	5
1500	13	13	13	11.5	12	11.75	6	5.5	5.75
1600	15	15	15	12	12	12	6	6	6
1700	19	19	19	15.5	15	15.25	8	8	8
1800	20	20	20	16.5	16	16.25	9.5	10	9.75

Podemos observar que los resultados entre los duplicados de las pruebas son iguales en la mayoría de los casos, y en los que no, difieren a lo mucho en una unidad. Con esto podemos confiar que en las pruebas subsecuentes será posible observar el efecto que tienen las variables de tipo de impulsor y velocidad de agitación en el consumo de potencia en el proceso del lavado de este suelo.

### **6.9. Efecto de la velocidad de agitación y el tipo de impulsor en la potencia consumida.**

Se llevaron a cabo pruebas de lavado donde se mantuvieron constantes las variables de tiempo (que se definió de 2.5 horas con las pruebas de cinética de lavado), altura del impulsor ( $3/5$  del diámetro del impulsor) y la presencia de deflectores. Se modificaron las variables de velocidad de agitación y el tipo de impulsor, a las pruebas realizadas se les fue midiendo la potencia que consumían durante todo el transcurso de tiempo que tomó llevarla a cabo con el fin de observar si ocurría algún cambio durante el proceso, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 6.10., 6.11. y 6.12, correspondientes al impulsor Rushton, Tres Paletas Planas y Cuatro Paletas inclinadas respectivamente.

### Cambio de Potencia en Watts en el Tiempo. (Impulsor Rushton)

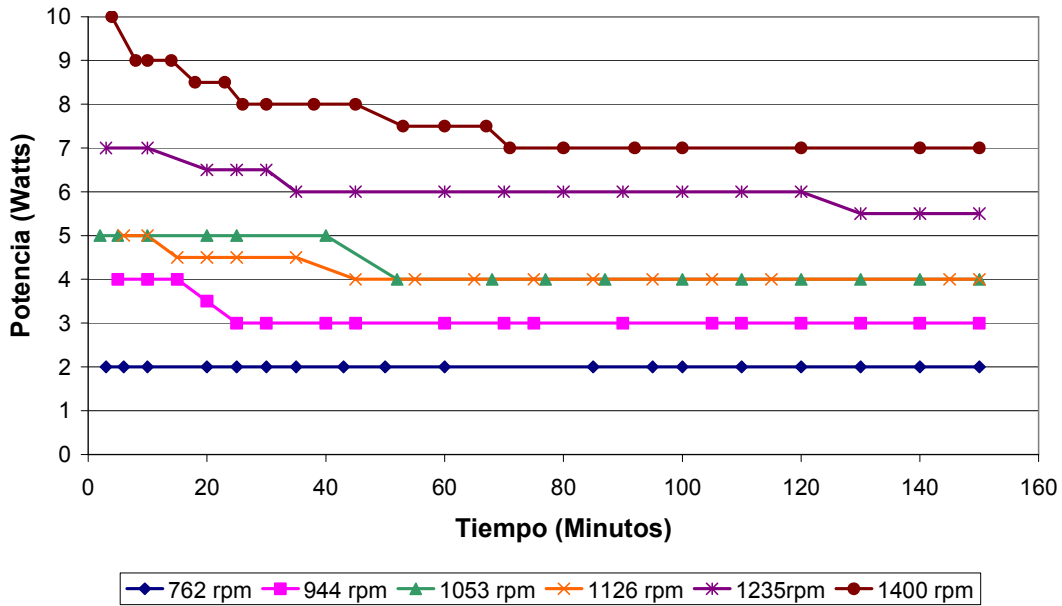


Figura 6.10. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor Rushton.

### Cambio de Potencia en Watts en el Tiempo. (Impulsor: 3 Paletas Planas)

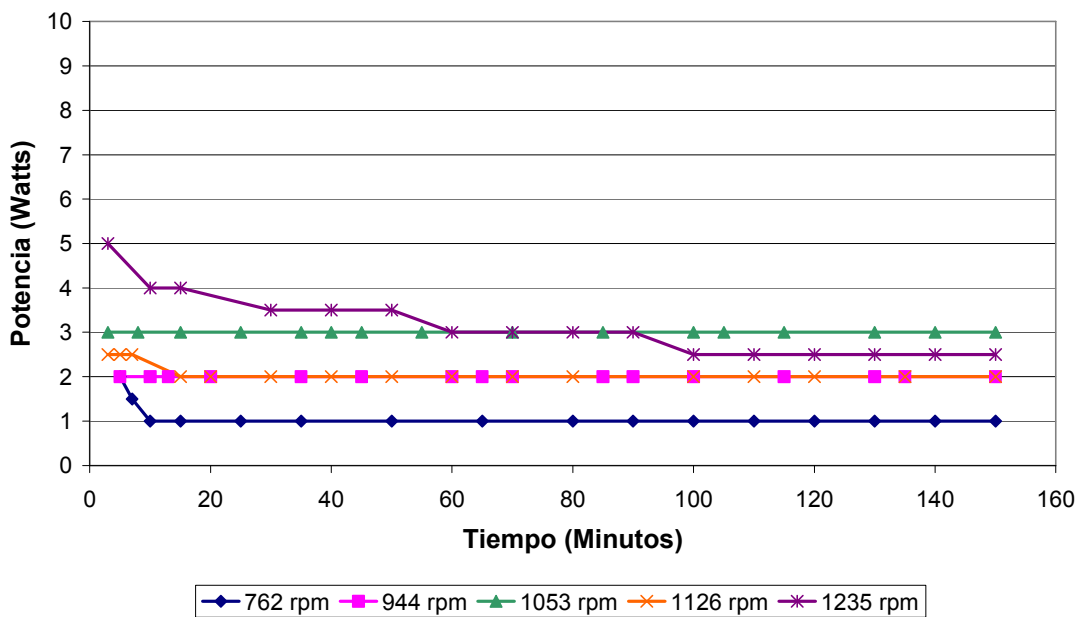


Figura 6.11. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor de tres paletas planas.

### Cambio de Potencia en Watts en el Tiempo. (Impulsor: 4 Paltas Inclinadas)

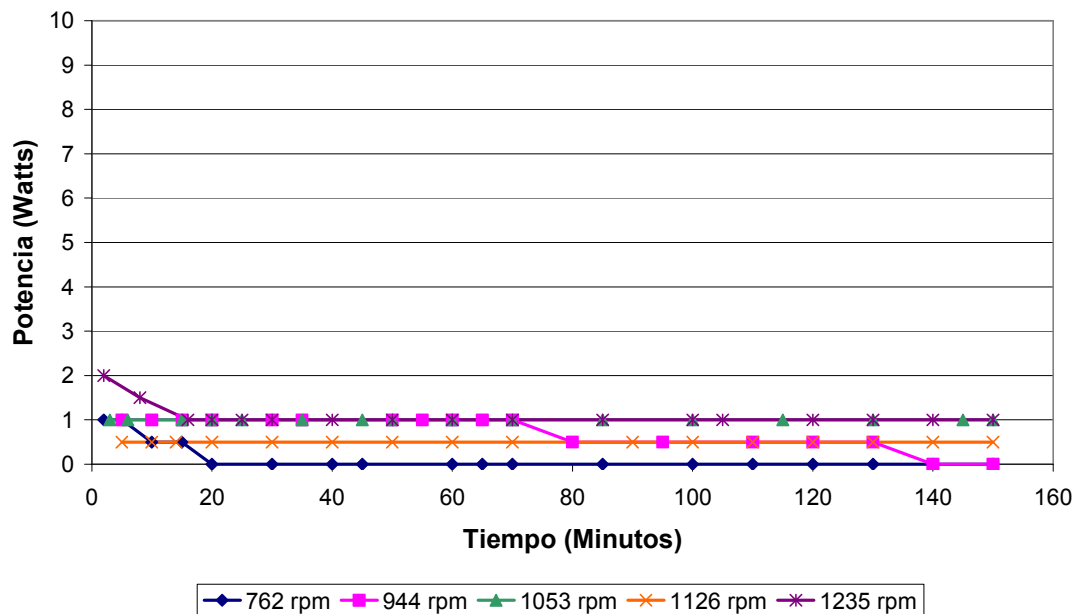


Figura 6.12. Cambio de potencia en el tiempo para el impulsor de cuatro paletas inclinadas.

En las tres gráficas mostradas anteriormente observamos que sí hay un cambio en la potencia durante el tiempo, la potencia tiende a bajar conforme se desarrolla el proceso. Observamos que este cambio generalmente ocurre en el inicio del lavado y que es más pronunciado en las pruebas que se realizaron con una mayor velocidad de agitación y en las que se realizaron con impulsores de flujo radial (Rushton y 3 Paletas Planas).

Esta disminución de la potencia puede deberse a dos cosas, la primera y por la cual probablemente se sufre el mayor cambio, es la entrada de aire al sistema, que provoca una disminución de la densidad del fluido. Esta entrada de aire ocurre debido a la misma agitación y a que el surfactante lo atrapa formando espuma. La segunda es que conforme se lleva a cabo el proceso se va dando el fenómeno de que tanto la composición del sólido como del líquido cambia ya que el hidrocarburo se desprende del suelo al ser atrapado por el surfactante en micelas y se disuelve en el líquido, cambiando un poco su densidad.

También podemos observar en las gráficas que en general entre mayor sea la velocidad la potencia consumida por el sistema es mayor, aunque para los tres impulsores se presentan excepciones. De los tres impulsores, el de flujo axial (4 Paletas inclinadas), fue el que menor potencia consumió ya que no pasó de los 2 W para la velocidad de 1235 rpm, y el que más potencia consumió fue el Rushton consumiendo hasta 7 W para la misma velocidad.

Para observar más claramente estos consumos de energía se integró la potencia consumida en cada caso con respecto al tiempo y se obtuvo una energía total consumida para cada velocidad, esto se muestra en la Figura 6.13.

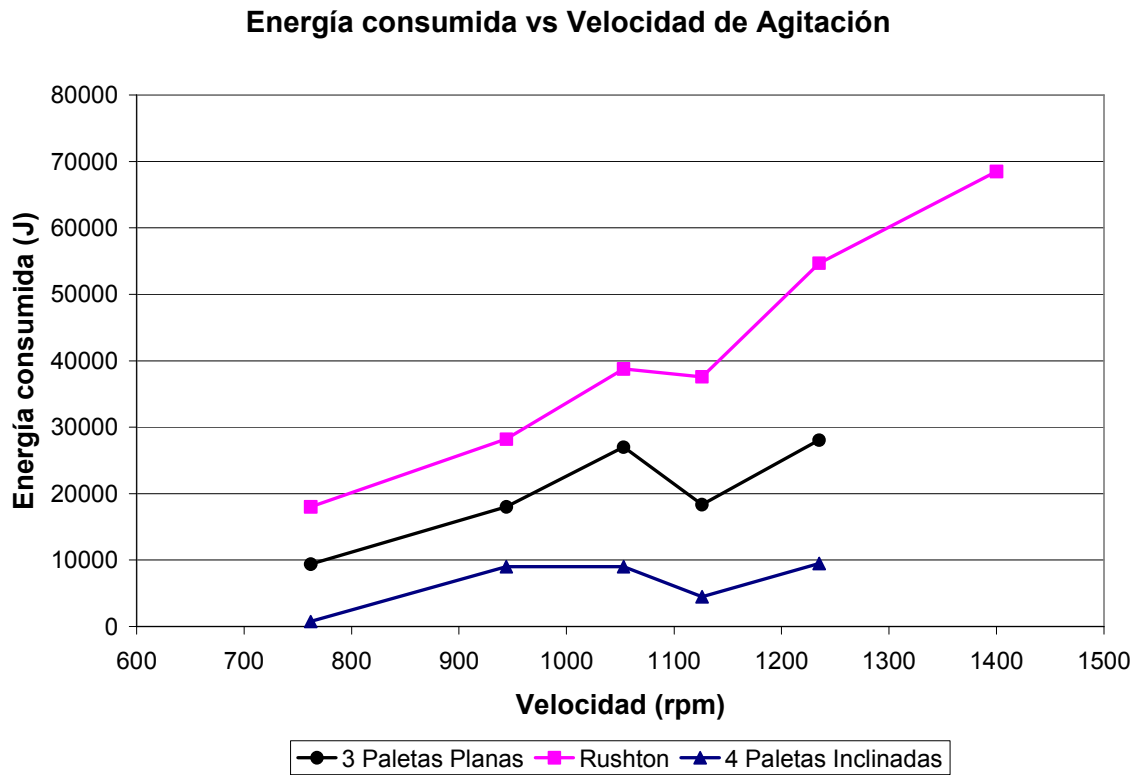


Figura 6.13. Energía consumida por el proceso de lavado en función de la velocidad de agitación

Es observable que conforme aumenta la velocidad de agitación se consume una mayor cantidad de energía, sin embargo ocurre que existe un área donde un aumento de la velocidad se refleja en la disminución de la energía consumida, al igual que ocurrió con la remoción de hidrocarburos. También se puede ver claramente que de los tres impulsores el que mas consume energía es el Rushton, seguido por el de 3 Paletas planas y finalmente el de 4 Paletas Inclinadas.

Esta disminución del consumo de energía en un inicio puede parecer buena, ya que probablemente como se tiene una velocidad más alta, aunque la energía requerida sea menos se podría obtener una remoción de hidrocarburos mayor, sin embargo hay que recordar que también en las gráficas de remoción de hidrocarburos contra velocidad se presentaba este fenómeno de una disminución al aumentar la velocidad. Por esto se realizará, en las figuras 6.14., 6.15. y 6.16., una comparación entre las gráficas de energía consumida vs velocidad de agitación y las de remoción vs Velocidad de Agitación y también para determinar, a partir de estos dos parámetros a que velocidad nos convendría trabajar y con que impulsor.

### **6.10. Elección del impulsor y de la velocidad de agitación**

En las gráficas que se muestran a continuación ( 6.14, 6.15 y 6.16) se pretende observar al mismo tiempo la remoción alcanzada y la energía consumida para cada impulsor y a diferentes velocidades. Es necesario hacer notar que la energía consumida se dividió entre 600, esto fue con el único objeto de acercar las curvas de los resultados y lograr observar a ambas más fácilmente.

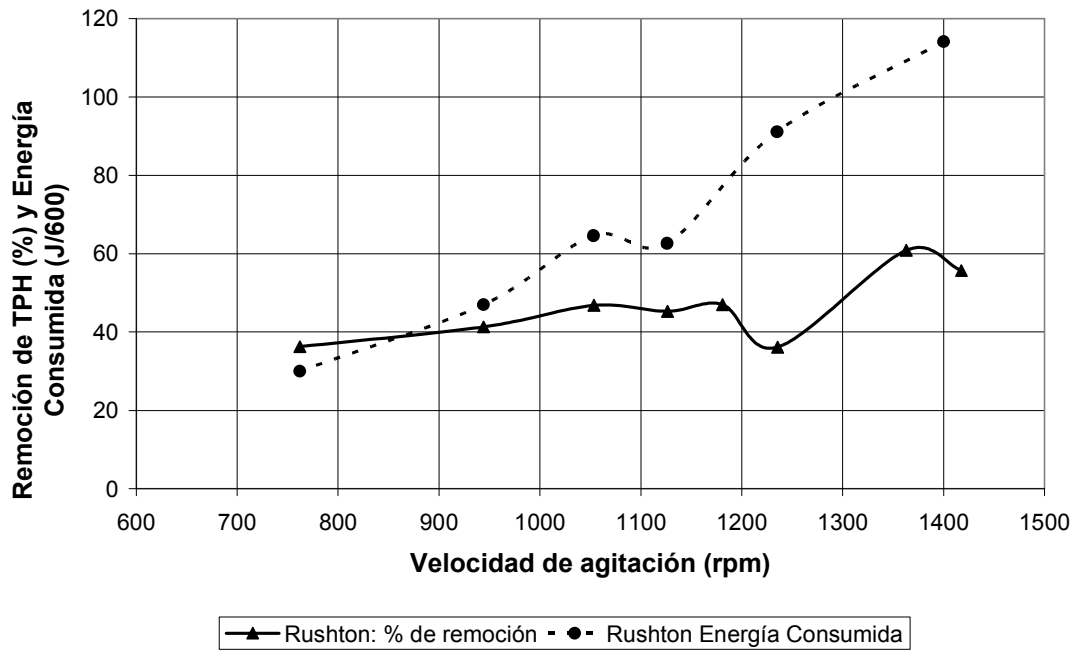


Figura 6.14. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor Rushton.

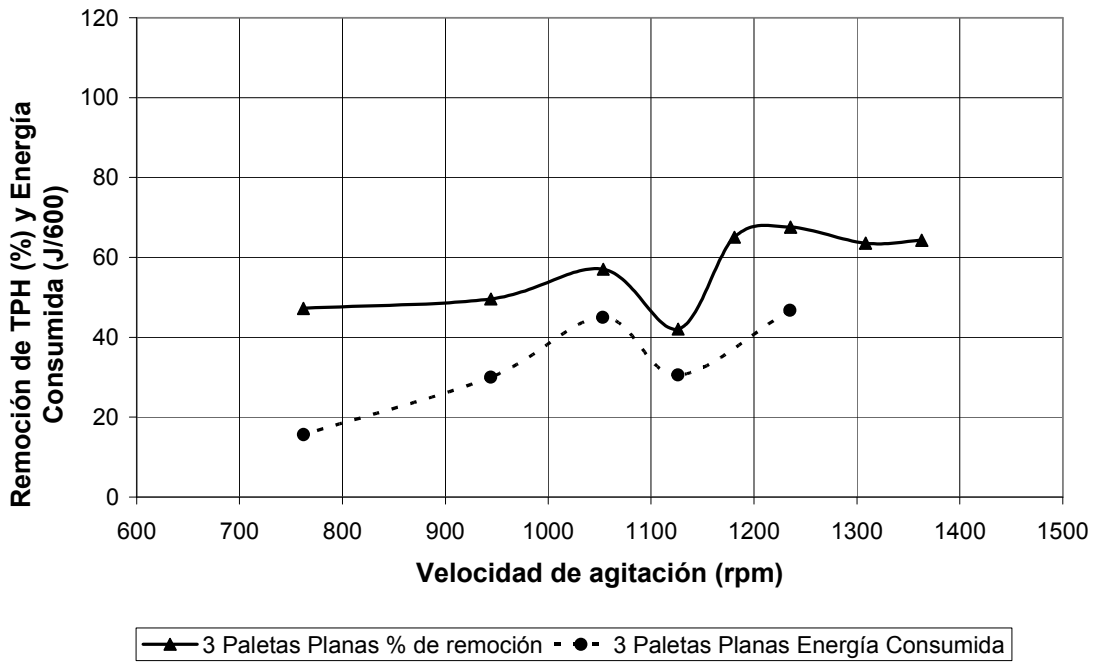


Figura 6.15. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor de tres paletas planas.



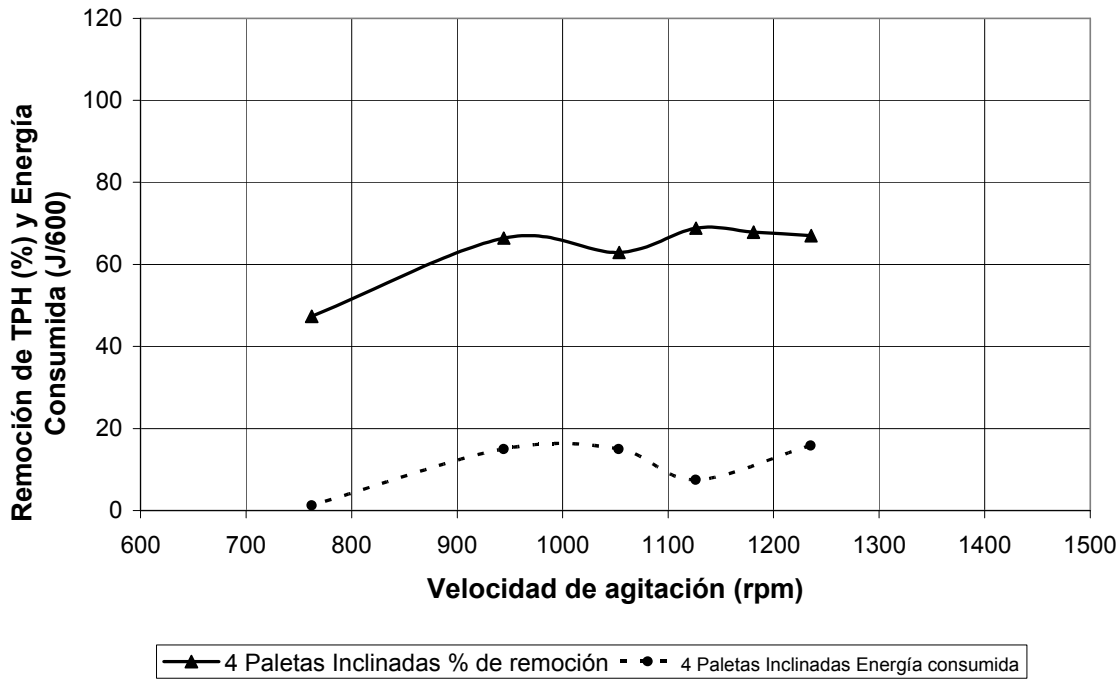


Figura 6.16. Energía consumida y remoción alcanzada en función de la velocidad de agitación para el impulsor de cuatro paletas inclinadas.

En las gráficas de las figuras 6.14., 6.15 y 6.16. observamos que a la velocidad donde se da la disminución de la energía consumida (1126 rpm) para cada impulsor ocurren diferentes situaciones.

El impulsor Rushton a esta velocidad no se encuentra en su periodo de disminución de la remoción, sin embargo a esa velocidad el porcentaje de remoción aún no es alto, se encuentra apenas en el 45% y consume una energía de 37575 J, sin embargo para lograr su máxima remoción que es de un 58% la energía consumida aumenta considerablemente a 68475 J.

Para el impulsor de 3 Paletas Planas no sería recomendable trabajar a esta velocidad, ya que aunque ocurre que la energía consumida disminuye, también lo hace considerablemente el porcentaje de remoción, se obtendría una remoción del 42 %

consumiendo una energía de 18330 J. En este caso sería mucho más recomendable trabajar a una velocidad alrededor de 1200 rpm, donde se consumirían 28065 J y se obtendría un porcentaje de remoción aproximadamente del 66 %.

Finalmente Para el caso de el impulsor de 4 Paletas Inclinas si es recomendable trabajar a 1126 rpm, ya que en este caso es cerca de esta velocidad, donde se presenta una disminución en el consumo de energía, cuando se llega al periodo de estabilidad, a la máxima remoción alcanzada, de manera que en estas condiciones se consumirán 4500 J y se obtendrá una remoción cerca del 67%.

En la grafica que se presenta a continuación (Figura 6.17.) se puede ver el porcentaje de remoción contra la energía consumida para cada impulsor. Se observa muy claramente que El impulsor de 4 Paletas Planas obtiene unas mayores remociones con un menor consumo de energía, además vemos que para el impulsor Rushton trabaja con consumos de energía grandes y sin embargo no llega a remover tanto como los otros dos impulsores.

En otros trabajos, como el de Bounafir et al (2001), en el que se estudió el mezclado en sistemas gas-líquido reporta que la energía de homogenización necesaria con una configuración axial es menor que con la radial y se presentan mejores desempeños en el mezclado. Así mismo Takenaka et al. (2001), que realizó un estudio de mezclado en sistemas de tres fases pero con un alto contenido de sólidos (arriba del 40%) encontró también que los impulsores de flujo mixto (axial y radial) logran mejores resultados ya que consumen menos energía que los radiales.

### Remoción vs Energía Consumida

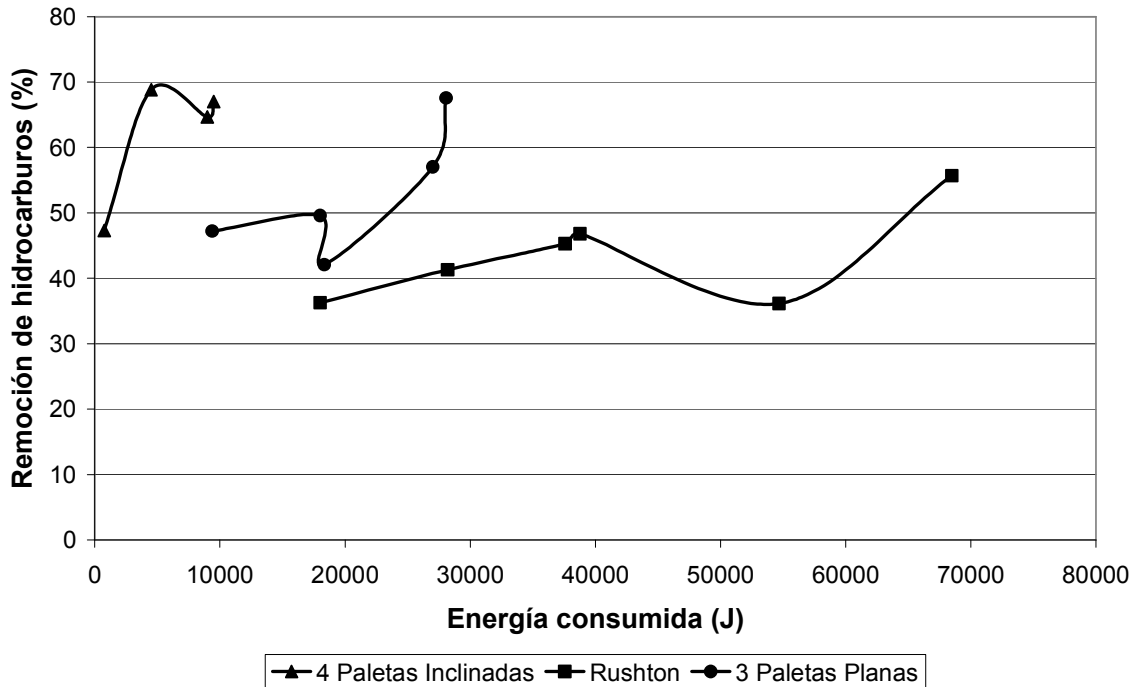


Figura 6.17. Remoción alcanzada en función de la energía consumida.

Con todo lo analizado anteriormente se puede decir que el impulsor de flujo axial Cuatro Paletas Inclinas es el más apropiado para la operación del lavado del suelo tratado en este trabajo. Se encontró que este impulsor obtiene una remoción mayor a menores velocidades de agitación y por lo tanto con un menor consumo de energía.

## 6.11. Caracterización del agua residual

En la tabla 6.14. se exponen los resultados de la caracterización del agua residual que se juntó de todas las pruebas de lavado, es importante mostrar esto para tener idea de la calidad de las aguas residuales generadas en el proceso. Se trata de un agua dura (de 300 a 450 mg/L de CaCO<sub>3</sub>) ya que contiene 337.31 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. También es de resaltar el alto valor de DQO (arriba de 20 000 mg/kg, aunque la DBO es de aproximadamente 17000 mg/kg, dando una razón DBO/DQO de 0.85. También es de notar el contenido de tensoactivo de mas de 3500 mg/kg y grasas y aceites solo de 94 mg/kg.

*Tabla 6.14. Características del agua residual generada.*

Parámetros	Unidades	Cantidad
pH	unidades	5.21
Conductividad	µmhos/cm	1,353
Demanda Química de Oxígeno Total	mg/L	20,153
Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble	mg/L	17,183
Sólidos Totales	mg/L	14,919
Sólidos Totales Volátiles	mg/L	8,714.50
Sólidos Totales Fijos	mg/L	6,204.50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	645.75
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	303.75
Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	342
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	14,275.25
Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	8,410.75
Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	5,862.50
Sólidos Sedimentables	mg/L	7
Dureza como CaCO <sub>3</sub>	mg/L	337.31
SAAM	mg/L	3,637.90
grasas y aceites	mg/L	94.5
Fósforo	mg/L	10.382
Aluminio	mg/L	429.03
Cadmio	mg/L	0.106
Cromo total	mg/L	1.254
Cobre	mg/L	0.373
Fierro	mg/L	289.64
Plomo	mg/L	1.114
Níquel	mg/L	0.849
Zinc	mg/L	2.58
Calcio	mg/L	113.17
Potasio	mg/L	14.48
Magnesio	mg/L	13.29
Sodio	mg/L	754.31

Para dar una idea de la calidad del agua residual generada se comparará con la calidad que deben tener las descargas de aguas residuales en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público y el agua para consumo humano.

Los límites máximos permisibles de contaminantes para estos casos se exponen en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, en la NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público y en la NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la Tabla 6.15.

*Tabla 6.15 Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales. NOM-002-ECOL-1996.*

Parámetros (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Límites Máximos Permisibles		
	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Los límites máximos permisibles de algunos contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público se exponen en la tabla siguiente.

*Tabla 6.16. Límites máximos permisibles en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. NOM-003-ECOL-1997*

Parámetro	Unidades	Tipo de Reuso	
		Servicios al público con contacto directo	Servicios al público con contacto indirecto u ocasional
Coliformes fecales	NMP/100 mL	1,000	240
Huevos de helminto	(h/L)	5	1
Grasas y aceites	(mg/L)	15	15
DBO5	(mg/L)	30	20
SST	(mg/L)	30	20
Materia flotante		Ausente	Ausente

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 6.17. Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

*Tabla 6.17. Límites máximos permisibles de constituyentes químicos para el agua de consumo humano. NOM-127-SSA1-1994.*

Característica	Límite Permissible	Característica	Límite Permissible
Aluminio	0.2	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
Arsénico	0.05	pH (potencial de hidrógeno) unidades de pH	6.5-8.5
Bario	0.7	Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Cadmio	0.005	Clordano (total de isómeros)	0.3
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07	DDT (total de isómeros)	1
Cloro residual libre	0.2-1.5	Gamma-HCH (lindano)	2
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250	Hexaclorobenceno	0.01
Cobre	2	Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Cromo total	0.05	Metoxicloro	20
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500	2,4 - D	50
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	Plomo	0.025
Fierro	0.3	Sodio	200
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.5	Sólidos disueltos totales	1000
Manganeso	0.15	Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400
Mercurio	0.001	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Nitratos (como N)	10	Trihalometanos totales	0.2
Nitritos (como N)	0.05	Zinc	5

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 6.18.) se pretende mostrar de manera clara las diferencias entre la calidad del agua generada por este trabajo y los límites de contaminantes especificados por las normas. Como vemos los contenidos de metales, el pH y los sólidos disueltos totales se encuentran muy por encima de lo que es un agua potable, claramente el agua generada tal como se encuentra no puede ser de consumo humano. También observamos que supera algunos límites establecidos por la NOM-003-ECOL-1997 que establece los límites para aguas tratadas que se reusen con servicios al público, como la la DBO que es de 17,183 mg/L, los sólidos suspendidos totales, el contenido de grasas y aceites y de plomo. Sin embargo observamos que el agua generada se encuentra dentro de los límites permisibles para las descargas en el alcantarillado urbano y municipal (NOM-002-ECOL-1996).

Tabla 6.18. Calidad del agua residual generada y la requerida por las normas oficiales mexicanas.

Calidad del agua residual generada		Calidad de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado (NOM-002-ECOL-1996)			Calidad del agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994)	Calidad de aguas tratadas que se reusen en servicios al público NOM-003-ECOL-1997	
Parámetros	Cantidad	Promedio				contacto	
		Mes	Diario	Inst.	directo	indirecto	
pH	5.21				6.5-8.5		
DBO	17,183					20	30
Sólidos Suspendidos Totales	645.75					20	30
Sólidos Disueltos Totales	14,275.25				1000		
Sólidos Sedimentables	7	5	7.5	10		Promedio	
Dureza como CaCO <sub>3</sub>	337.31				500	mensual	diario
grasas y aceites	94.5	50	75	100		15	15
Fósforo	10.382						
Aluminio	429.03				0.2		
Cadmio	0.106	0.5	0.75	1	0.005	0.2	0.4
Cromo total	1.254				0.05	1	1.5
Cobre	0.373	10	15	20	2	4	6
Fierro	289.64				0.3		
Plomo	1.114	1	1.5	2	0.025	0.5	1
Níquel	0.849	4	6	8		2	4
Zinc	2.58	6	9	12	5		

## **7. CONCLUSIONES**

El suelo que se trató, proveniente de la zona de la batería de separación No. 3 del campo petrolero Cinco Presidentes, que se localiza en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, se encuentra altamente contaminado por hidrocarburos del petróleo. Dentro de la caracterización se determinó que el suelo estaba prácticamente compuesto por grava y arena lo que lo hace susceptible al proceso de lavado de suelos, ya que como está expuesto en la literatura esta técnica no es recomendable para suelos con alto contenido de limo y arcilla.

De los resultados obtenidos en las pruebas para la elección del surfactante se observó que las remociones más altas se consiguieron con la mezcla de surfactante y sal, sin embargo el añadir sal a la solución puede causar otros problemas posteriores, ya que aumenta la salinidad del suelo y del agua de lavado, es por esto que se eligió el surfactante SDS al 1% p/v ya que no causa estos problemas, el costo es bajo y también se obtuvo una remoción buena de hidrocarburos.

De las pruebas de mezclado realizadas en este trabajo se concluye que, como se observó en las cinéticas de lavado, esta operación tiene un límite de remoción de hidrocarburos que está determinado por las variables fisicoquímicas del sistema, como es la capacidad de remoción de la solución de surfactante. Entonces, por más que se juegue con las variables de operación tales como el tipo de impulsor o la velocidad de agitación, no se podrá rebasar ese límite, sin embargo lo que se puede lograr es llegar a este en menores tiempos y con un menor consumo de energía.

En general se observó que los impulsores axiales en un menor tiempo logran una remoción mayor del hidrocarburo, a diferencia de lo que se esperaba en la hipótesis, donde se planteaba la posibilidad de que el Rushton al ejercer una mayor energía de corte alcanzaría mayores remociones con respecto a los otros.



También se vio que existe una tendencia general a que entre mayor sea la velocidad de agitación, mayor será la remoción de hidrocarburo y mayor será el consumo de energía. Sin embargo se identificaron excepciones para los dos casos donde estos parámetros disminuían considerablemente al incrementar la velocidad, lo que probablemente significa que se llegan a formar patrones de flujo que perjudican mucho el proceso de lavado.

Las velocidades a las que se trabajó fueron mayores a la velocidad mínima para la completa suspensión de sólidos ( $N_{js}$ ), y, como acabamos de mencionar se manifestó un incremento considerable en la remoción al aumentar esta variable. En la literatura generalmente se dice que no tiene caso trabajar por encima de esta velocidad (Armenante *et al* , 1997; Thanapalan, 1999), sin embargo encontramos que por encima de esta existe un aumento considerable en la remoción, lo que quiere decir que en este caso la energía que damos al proceso, adicional a la que tendríamos que dar para solo mantener en suspensión todos los sólidos ayuda a lograr el proceso de lavado. Esto es muy importante ya que muchos procesos se escalan y diseñan en función de la  $N_{js}$  pero para el caso de este tipo de aplicación hay que remarcar que no es un buen criterio, ya que la energía adicional que damos al sistema se manifiesta en una importante remoción de los hidrocarburos.

Considerando todos los parámetros evaluados se concluye que el impulsor de flujo axial (4 Paletas Inclinadas) fue el más adecuado para esta operación ya que logró mejores remociones a velocidades más bajas de las que necesitaron los demás impulsores, y la potencia que consumió fue mucho menor.

Con este impulsor se realizó un pequeño ejercicio de escalamiento donde lo que es importante remarcar es que para diseñar o escalar un tanque de mezclado para la operación de lavado de suelos no se debe de tomar como criterio la  $N_{js}$  ya que el sistema necesita una mayor energía para alcanzar mejores resultados, además se debe tener cuidado de no elegir una velocidad donde se presenten patrones de flujo que provoquen que se obtengan menores remociones de hidrocarburo.

## 8. APÉNDICE

En este apéndice se muestran las tablas de datos de donde partieron las gráficas y figuras que se exponen en el desarrollo de este trabajo.

*Tabla 9.1. Distribución del tamaño de las partículas en el suelo*

<b>Malla</b>	<b>tamaño de la apertura de la malla(mm)</b>	<b>tamaño promedio de partícula (mm)</b>	<b>Peso del suelo retenido (kg)</b>	<b>% de suelo que pasa la malla</b>
4	4.75	5.525	0.042	95.6792
6	3.35	4.05	0.154	79.9097
10	2	3.375	0.099	69.7385
20	0.85	1.425	0.137	55.6448
40	0.445	0.6475	0.237	31.3363
60	0.25	0.3475	0.269	3.7197
80	0.18	0.215	0.020	1.6321
100	0.15	0.165	0.011	0.5394
fondos	menor .15	0.14	0.005	0.0000

*Tabla 9.2. Concentración de HTPs en las distintas fracciones de suelo.*

<b>Malla</b>	<b>Tamaño promedio de la partícula (mm)</b>	<b>Contenido de HTPs mg/kg</b>
4	4.75	192130
6	3.35	176060
10	2	150670
20	0.85	94180
40	0.445	80250
60	0.25	45580
80	0.18	43590
100	0.15	51550

Tabla 9.3. Resultados de las pruebas de lavado con un solo surfactante

Surfactante	Concentración de HTPs inicial (ppm)	Concentración de HTPs final (ppm)	Remoción (%)
surfacpol Lo	150671.0207	107958.6024	28.348131
tween 80	150671.0207	126150.6502	16.2741118
brij 35	150671.0207	124197.1307	17.5706582
brij 58	150671.0207	141789.4217	5.89469626
emulgin 600	150671.0207	131592.0646	12.662658
emulgin 1000	150671.0207	142700.788	5.28982455
texapon 40	150671.0207	130528.0731	13.3688266
SDS	150671.0207	119810.5926	20.4819931
Maranil Lab	150671.0207	110424.7513	26.7113538
surfacpol G	150671.0207	131799.8919	12.5247235
parafix CAPB	150671.0207	119037.9892	20.9947681
agua de mar	150671.0207	136873.5084	9.15737628

Tabla 9.4. . Resultados de las pruebas de lavado con surfactante y sal o mezclas de surfactantes.

Surfactante	Concentración de HTPs inicial (ppm)	Concentración de HTPs final (ppm)	Remoción (%)
SDS .5% + 1% NaCl	150671.0207	114212.0825	24.197711
SDS .5% + 3% NaCl	150671.0207	116062.0235	22.9699095
SDS .5% + 5% NaSi	150671.0207	86591.39871	42.5294935
SDS .5% + 7% NaSi	150671.0207	82253.75693	45.4083761
SDS .5% + TW 80	150671.0207	124295.4731	17.5053885
SDS + Agua de mar	150671.0207	108506.2696	27.9846456
SDS 1%	150671.0207	97215.02849	35.4786156
Maranil + 3% NaCl	150671.0207	113128.3241	24.9169989
Maranil + 7% NaSi	150671.0207	88767.86389	41.0849787
Maranil + Agua de mar	150671.0207	122437.5847	18.7384646

Tabla 9.5. . Cinéticas del proceso de lavado de suelos.

<b>Rushton</b>		<b>3 Paletas Planas</b>		<b>4 Paletas Inclinadas</b>		<b>Propela marina</b>	
Tiempo (min)	Absorbancia	Tiempo (min)	Absorbancia	Tiempo (min)	Absorbancia	Tiempo (min)	Absorbancia
16.667	0.021	5	0.022	15.5	0.026	15	0.041
34	0.044	15	0.05	34	0.079	28	0.074
47	0.054	25	0.054	45	0.07	47	0.098
60	0.093	40	0.061	62	0.101	61	0.133
81.5	0.107	60	0.122	80	0.177	85	0.137
100.67	0.114	80	0.138	100	0.165	106	0.186
118.5	0.132	98	0.129	132	0.208	126	0.231
166	0.149	121	0.165	160	0.241	157	0.265
199	0.179	154	0.196	190	0.268	188	0.255
234	0.225	190	0.217	220	0.274	220	0.256
264	0.288	220	0.258	250	0.246	250	0.271
300	0.239	254	0.273	280	0.273	285	0.283
		292	0.264	300	0.238	300	0.278
		300	0.27				

Tabla 9.6. Remoción de TPHs para diferentes velocidades de agitación.

<b>Impulsor Rushton</b>		<b>Impulsor 4 paletas inclinadas</b>		<b>Impulsor 3 paletas planas</b>	
<b>Velocidad de agitación (rpm)</b>	<b>Remoción de HTPs (mg/kg)</b>	<b>Velocidad de agitación (rpm)</b>	<b>Remoción de HTPs (mg/kg)</b>	<b>Velocidad de agitación (rpm)</b>	<b>Remoción de HTPs (mg/kg)</b>
762	36	762	47	762	47
944	41	944	66	944	50
1053	47	1053	63	1053	57
1126	45	1126	69	1126	42
1181	47	1181	678	1181	65
1235	36	1235	67	1235	68
1363	61			1308	64
1417	56			1363	64

Tabla 9.7. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor Rushton a diferentes velocidades.

Velocidad = 762 rpm		Velocidad= 944 rpm		Velocidad = 1053 rpm		Velocidad = 1126 rpm		Velocidad = 1235 rpm		Velocidad = 1400 rpm	
Tiempo (min)	Potencia (W)	T (min)	P (W)	T (min)	P (W)	T (min)	P (W)	T (min)	P (W)	T (min)	P (W)
3	2	5	4	2	5	6	5	3	7	4	10
6	2	10	4	5	5	10	5	10	7	8	9
10	2	15	4	10	5	15	4.5	20	6.5	10	9
20	2	20	3.5	20	5	20	4.5	25	6.5	14	9
25	2	25	3	25	5	25	4.5	30	6.5	18	8.5
30	2	30	3	40	5	35	4.5	35	6	23	8.5
35	2	40	3	52	4	45	4	45	6	26	8
43	2	45	3	68	4	55	4	60	6	30	8
50	2	60	3	77	4	65	4	70	6	38	8
60	2	70	3	87	4	75	4	80	6	45	8
85	2	75	3	100	4	85	4	90	6	53	7.5
95	2	90	3	110	4	95	4	100	6	60	7.5
100	2	105	3	120	4	105	4	110	6	67	7.5
110	2	110	3	130	4	115	4	120	6	71	7
120	2	120	3	140	4	145	4	130	5.5	80	7
130	2	130	3	150	4	150	4	140	5.5	92	7
140	2	140	3					150	5.5	100	7
150	2	150	3							120	7
										150	7

Tabla 9.8. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor de tres paletas planas a diferentes velocidades.

Velocidad = 762 rpm		Velocidad= 944 rpm		Velocidad = 1053 rpm		Velocidad = 1126 rpm		Velocidad = 1235 rpm	
Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)
5	2	5	2	3	3	3	2.5	3	5
7	1.5	10	2	8	3	5	2.5	10	4
10	1	13	2	15	3	7	2.5	15	4
15	1	20	2	25	3	15	2	30	3.5
25	1	35	2	35	3	20	2	40	3.5
35	1	45	2	40	3	30	2	50	3.5
50	1	60	2	45	3	40	2	60	3
65	1	65	2	55	3	50	2	70	3
80	1	70	2	70	3	60	2	80	3
90	1	85	2	85	3	70	2	90	3
100	1	90	2	100	3	80	2	100	2.5
110	1	100	2	105	3	100	2	110	2.5
120	1	115	2	115	3	110	2	120	2.5
130	1	130	2	130	3	120	2	130	2.5
140	1	135	2	140	3	135	2	140	2.5
150	1	150	2	150	3	150	2	150	2.5

Tabla 9.9. Consumo de potencia en el tiempo para el impulsor de cuatro paletas inclinadas a diferentes velocidades.

Velocidad = 762 rpm		Velocidad= 944 rpm		Velocidad = 1053 rpm		Velocidad = 1126 rpm		Velocidad = 1235 rpm	
Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Tiempo (min)	Potencia (W)
2	1	5	1	3	1	5	0.5	2	2
5	1	10	1	6	1	10	0.5	8	1.5
10	0.5	15	1	15	1	14	0.5	16	1
15	0.5	20	1	20	1	20	0.5	20	1
20	0	30	1	25	1	30	0.5	25	1
30	0	35	1	35	1	40	0.5	30	1
40	0	50	1	45	1	50	0.5	40	1
45	0	55	1	50	1	60	0.5	50	1
60	0	60	1	60	1	70	0.5	60	1
65	0	65	1	70	1	90	0.5	70	1
70	0	70	1	85	1	100	0.5	85	1
85	0	80	0.5	100	1	110	0.5	100	1
100	0	95	0.5	115	1	120	0.5	105	1
110	0	110	0.5	130	1	130	0.5	120	1
120	0	120	0.5	145	1	140	0.5	130	1
130	0	130	0.5	150	1	150	0.5	140	1
140	0	140	0					150	1
150	0	150	0						

Tabla 9.10. Energía total consumida, potencia consumida y remociones alcanzadas por los tres impulsores a distintas velocidades de agitación.

Impulsor	Velocidad de agitación (rpm)	Energía total consumida (J)	Potencia Promedio (W)	Potencia consumida por litro (W/L)	Remoción de HTPs alcanzada (mg/kg)
<b>3 Paletas Planas</b>	1235	28065	3.12	4.16	67.56
	1126	18330	2.04	2.72	42.07
	1053	27000	3.00	4.00	57.03
	944	18000	2.00	2.67	49.58
	762	9375	1.04	1.39	47.22
<b>Rushton</b>	1400	68475	7.61	10.14	55.69
	1235	54675	6.08	8.10	36.14
	1126	37575	4.18	5.57	45.28
	1053	38760	4.31	5.74	46.80
	944	28200	3.13	4.18	41.30
	762	18000	2.00	2.67	36.25
<b>4 Paletas Inclinadas</b>	1235	9510	1.06	1.41	67.01
	1126	4500	0.50	0.67	68.83
	1053	9000	1.00	1.33	62.91
	944	9000	1.00	1.33	66.40
	762	750	0.08	0.11	47.32

## 10. REFERENCIAS

- Angst, R.; Karume, M. 2005. *Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption*. Chemical Engineering Science. Vol. 61, pp. 2864-2870.
- Armenante, Piero M.; Uehara Nagamine, Ernesto. 1998. (A) *Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks*. Chemical Engineering Science. Vol. 53, pp. 1757-1775.
- Armenante, Piero M.; Uehara Nagamine, Ernesto; Susanto, essyca. 1998. (B) *Determination of correlations to Predict the Minimum Agitation Speed for Complete Solid Suspension in Agitated Vessels*. The Canadian journal of chemical engineering. Vol. 76, pp. 413-419.
- Bakker, Andre; Fasano, Julian; Myers, Kevin. 1998. *Effects of flow pattern on the solids distribution in a stirred tank*. The Online CFM Book, en: <http://www.bakker.org/cfm>.
- Boon, L.A.; Hoeks, F.W.J.M.M.; van der Lans, R.G.J.M.; Bujalski, W.; Wolff, M.O.; Nienow, A.W. 2002. *Comparing a range of impellers for "stirring as foam disruption"*. Biochemical Engineering Journal. Vol. 10, pp. 183-195.
- Bouaifi, Mounir; Roustan, Michel. 2001 *Power consumption, mixing time and homogenisation energy in dual-impeller agitated gas-liquid reactors*. Chemical Engineering and Processing. Vol. 40, pp. 87-95.
- Buckman, Harry D. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Editorial Limusa, México.
- Contreras Camacho, Diana; Fuentes Díez, Nuria; Saucó Martínez, Cristina. *Análisis y determinación de la composición de un suelo*. En [www.ubu.es](http://www.ubu.es), visitado en Febrero del 2007.

- Dan Taca, Constantin; Paunescu, Mihaela. 2000. *Suspension of solid particles in spherical stirred vessels*. Chemical Engineering Science. Vol. 55, pp. 2989-2993.
- Deshpande, S.; Shiau, B. J.; Wade, D.; Sabatini, D. A.; Harwel, J. H. 1999. *Surfactant Selection for Enhancing ex-situ soil washing*. Water Research. Vol. 33, No. 2, pp. 351-360.
- Domínguez R.; Aguilera H. 1990. *Metodología de análisis físico-químicos de suelos*. Técnicas de laboratorio. Facultad de ciencias, UNAM. México.
- Fan, C. Y.; Krishnamurthy, S. 1995. *Enzymes for enhancing bioremediation of petroleum contaminated soils: a brief review*. Air Waste Manage. Assoc. Vol. 45, pp. 453-460.
- Feng Wang; Weijing Wang; Yuefa Wang; Zai-Sha Mao. 2003. *CFD simulation of solid-liquid two-phase flow in baffled stirred vessels with rushton impellers*. 3<sup>rd</sup> international conference on CFD in the minerals and process industries. Pp. 287-292.
- Gül Özcan-Taskin; Hongyuan Wei. 2003. *The Effect of impeller-to-tank diameter ratio on draw down of solids*. Chemical Engineering Science. Vol. 58, pp. 2011-2022.
- Iturbe A. Rosario; Castro R. Alejandrina y Madrigal M. Ismael. 1998. *Técnicas de Rehabilitación de Suelos y Acuíferos*. Series del Instituto de Ingeniería. UNAM. México. 612: 1-5.
- Iturbe A., Rosario; Flores, Carlos; Chávez, Claudia; Bautista, Guadalupe; Torres, Luís G. 2004. *Remediation of contaminated soil using soil washing and biopile methodologies at a field level*. Soils and Sediments. Vol. 4, No. 2, pp. 115-122.
- Iturbe A. Rosario; Flores, Carlos; Chávez, Claudia; Ramírez, Adriana; Torres, Luis G. 2004. *In situ flushing of contaminated soils from a refinery: Organic compounds and metal removals*. Remediation. Pp. 141-152.



- Klammt, Christian; Schwarz, Daniel; Fendler, Klaus; Haase, Winfried; Dötsch, Volker. 2005. *Evaluation of detergents for the soluble expression of  $\alpha$ -helical and  $\beta$ -barrel type integral membrane proteins by a preparative scale individual cell-free expression system*. The FEBS Journal. Vol. 272, pp. 6024-603.
- Kostecky, Paul; Calábrese, Edgard. *Petroleum contaminated soils; Remediation Techniques, Environmental Fate and Risk Assessment*. Lewis Publishers. Vol. 2.
- Kuhlman, M. I.; Greenfield, T. M. 1999. *Simplified soil washing processes for a variety of soils*. Journal of Hazardous Materials. Vol. 66, pp. 31-45.
- Kuzmanic, N.; Ljubicic, B. 2001. *Suspension of floating solids with up-pumping pitched blade impellers; mixing time and power characteristics*. Chemical Engineering Journal. Vol. 84, pp. 325-333.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEEGERPA) Publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 28 de enero de 1988.
- López Jesica. 2004. *Cambios físicos, químicos y biológicos en un suelo contaminado con hidrocarburos debido al saneado con la técnica de lavado de suelo*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. Agosto 2004.
- López, Jesica; Iturbe, Rosario; Torres, Luís G. 2004. *Washing of soil contaminated with PAHs and heavy petroleum fractions using two anionic and one ionic surfactant: Effect of SALT addition*. Journal of environmental science and health. Vol. A39, No. 9, pp. 2293-2306.
- Micheletti, Martina; Nikiforaki, Loukia; Lee, Kalok; Yianneskis, Michael. 2003. *Particle concentration and mixing characteristics of moderate to dense solid-liquid suspensions*. American Chemical Society. Vol. 42, pp. 6236-6249.
- Milton J. Rosen. 1989. *Surfactant and Interfacial Phenomena*. Editorial. John Wiley and Sons. Estados Unidos.

- Mirisal A. Ibrahim. 2004. *Soil Pollution, Origin, Monitoring and Remediation*. Editorial Springer. Alemania.
- Montante, Giuseppina; Pinelli, Davide; Magelli, Franco. 2003. *Scale-up criteria for the solids distribution in slurry reactors stirred with multiple impellers*. Chemical Engineering Science. Vol. 58, pp. 5363 – 5372.
- Murugesan, Thanapalan. 2001. *Critical impeller speed for solid suspension in mechanically agitated contactors*. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 34, No. 3, pp. 423 - 429.
- Nocentini, M.; Pinelli, D.; Magelli, F. 2002. *Dispersion coefficient and settling velocity of the solids in agitated slurry reactors stirred with multiple Rushton turbines*. Chemical Engineering Science. Vol. 57, pp. 1877-1884.
- Norma oficial Mexicana. NOM-021-RECNAT-2000. *Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de suelos. Estudios, Muestreos y Análisis. Diario Oficial*. México.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. *Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación*. Diario Oficial. México
- Norma Oficial Mexicana. NOM-EM-138-ECOL-2002. *Límites Máximos Permisibles de Contaminación en Suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimiento para la Restauración*. Diario Oficial. México
- Ortíz Brito, Oscar; Ize Lema, Irina; Gavilán García, Arturo. 2003. *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México*. Gaceta Ecológica, octubre-diciembre, número 069. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal. México. Pp. 83-92.

- PROFEPA. 1999. *Restauración de suelos contaminados*. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados. México.
- Quadri, G. 1994. *Industria y política ambiental*. El nacional. Sábado 18 de junio, México.
- Rivera Cruz. 2004. *Normatividad Ambiental Mexicana y Tecnologías de Limpieza de Suelos Contaminados con Petróleo*. Memorias de la XVII Reunión científica-tecnologica forestal y agropecuaria Tabasco 2004. Pp. 176-184.
- Salager J. L. 2002. *Surfactantes Tipos y Usos*. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes Venezuela.
- Saval, B. S. 1995. *Acciones para la remediación de suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes de Agua y Suelo*. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
- SEMARNAT. 2002. *Comunicación con personal de la Dirección General de Manejo de Contaminantes*.
- Semple, K. T.; Reid, B. J. y Fermor, T. R. 2001. *Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants*. Environmental Pollution. Vol. 112, pp. 269-283.
- Seoáñez Calvo, Mariano. 1999. *Contaminación del suelo. Estudios, Tratamiento y Gestión*. Mundi-Prensa. Barcelona. Vol. 88, pp. 59-61.
- Skoog, Douglas A; West, Douglas M.; Holler, F. James; Crouch, Stanley R. 2004. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Thomson Brooks/cole. Belmont USA. Pp. 771-776.
- Takahashi, Kion; Fujita, Hisao. 1995. *A study of the agitation speed to just cause complete suspensión for non-spherical particles*. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 28, No. 2, pp. 237-240.

- Takahashi, Kion; Fujita, Hisao; Yokota, Toshiyuki. 1993. *Effect of size of spherical particle on complete suspension speed in agitated vessels of different scale*. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 26, No. 1, pp. 98-100.
- Takenaka, Katsuhide; Ciervo, Giovanna; Monti, Davide; Bujalski, Waldermar; Etchells, Arthur W.; Nienow, Alvin W. 2001. *Mixing of three-phase systems at high solids content (up to 40% w/w) using radial and mixed flow impellers*. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 34, No. 5, pp. 606-612.
- Torres, Luís G.; Aguirre, A.L.; Verdejo, A.; Iturbe, R. 2005. (A). *Enhanced soil-washing treatment for soils which are highly contaminated with crude oil*. Ecosystems and Sustainable Development. Vol 541.
- Torres, Luís G; Bandala, Erick R.; Saquelares, Jennifer; Climent, Mariana; Sampayo, Gustavo; Urquiza, Guadalupe; Iturbe, Rosario. 2006. *Caracterización y pruebas de tratabilidad de suelos contaminados con crudo provenientes de tabasco: Efecto del tamaño de partículas*. III Simposio internacional en ingeniería y ciencias para la sustentabilidad ambiental. UAM Azcapozalco..
- Torres, Luís G.; Jaimes, Jorge; Mijaylova, Petia; Ramirez, Esperanza; Jiménez, Blanca. 1997. *Coagulation-flocoulation pretreatment of high-load chemical-pharmaceutical industry waste water: mixing aspects*. Water science technology. Vol 36 No. 2-3, pp. 255-262.
- Torres, L. G.; Lemus, X.; Urquiza, G.; Verdejo, A.; Iturbe, R. 2005. (B) *Surfactant enhanced washing of drilling fluids, a promising remediation technique*. Tenside Surfactants Detergents. Vol. 42, No. 6, pp. 347-355.
- Torres, Luis G.; Orantes, José Luis and Iturbe, Rosario. 2003. *Critical micellar concentrations for three surfactants and their diesel-removal efficiencies in pretroleum-contaminated soils*. Environmental Geosciences, V.10, No.1, pp. 28-36.

- Torres, Luis G.; Zamora, Edmundo R. 2002. *Preparation and power consumption of surfactant-fuel oil-water emulsions using axial,radial and mixed flow impellers*. Fuel. Vol. 81, pp. 2289-2302.
- Torres, Luis G.; Zavala, Patricia; Beltrán, Margarita; Vaca, Mabel; Iturbe, Rosario. (2007) *Combination of natural gums and synthetic surfactants for washing of a soil highly contaminated with crude*. Environmental Geosciences. En Prensa.
- Triller, Delphine L.; Meuldijk, Jan; Koning, Cor E. 2003. *Production of colloidal stable lattices from low molecular weight ethylene-propylene-diene copolymers*. Polymer. Vol. 44, No. 26, pp. 7883-7890.
- Vincent W.Uhl; Van Essen, John A. 1986. *Scale-up of equipment for agitating liquids*. Mixing: Theory and Practice. Vol. 111, pp. 199-264.
- Volkering, Frank; Breure, Anton M.; van Andel, Johan G and Rolkens, Wim H. 1995. *Influence of nonionic surfactants on bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons*. Applied and Environmental Microbiology. Vol. 61, No. 5, pp. 1699-1705.
- Wilson, David J.; Clarke, Ann N. 1994. *Hazardous waste site. Soil Remediation. Theory and application of innovative technologies*. Marcel Dekker, New York. Pp 497-547.
- Xia Xing-Ixui; Lin Li; Xu Jia-lin. 2000. *Mixed surfactant washing of petroleum contaminants from the soils and sediments in the unsaturated zone*. Journal of environmental sciences. Vol. 12, No. 1, pp. 108-114.
- Yongfu, He; Koji, Takahashi. 1995. *Particle impeller impact for a six bladed 45° pitched turbine in an agitated vessel*. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 28, No. 6, pp. 786-789.

## **Páginas Web Consultadas (2006)**

### Leyes y Normas

- <http://www.profepa.gob.mx>
- <http://www.semarnat.gob.mx>

### Lavado de suelos

- <http://www.frtr.gov>
- <http://redalyc.uaemex.mx>
- [www.ubu.es](http://www.ubu.es)

### Mezclado

- <http://flow-control.globalspec.com>