

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CURSOS ESPECIALES DE GRADO
ÁREAS DE GAS**



**COMPARACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MÉTODOS PARA EL
CONTROL DEL DERRAME DE CRUDO EN LA PLATAFORMA
DEEPWATER HORIZON EN EL GOLFO DE MÉXICO**

Presentado por:

RAMÓN ALFREDO PITA

MILINYS DEL VALLE ROJAS RODRIGUEZ

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
Requisito Parcial para optar al Título de:**

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Agosto de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CURSOS ESPECIALES DE GRADO
ÁREAS DE GAS**



**COMPARACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MÉTODOS PARA EL
CONTROL DEL DERRAME DE CRUDO EN LA PLATAFORMA
DEEPWATER HORIZON EN EL GOLFO DE MÉXICO**

ASESOR

Ing. Nelson Ferreira

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
Requisito Parcial para optar al título de:**

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Agosto 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
CURSOS ESPECIALES DE GRADO
ÁREAS DE GAS**



**COMPARACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MÉTODOS PARA EL
CONTROL DEL DERRAME DE CRUDO EN LA PLATAFORMA
DEEPWATER HORIZON EN EL GOLFO DE MÉXICO**

JURADO

Ing. Quím. Nelson Ferreira

Jurado Principal

Barcelona, Agosto de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SOLO PODRAN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, EL CUAL NOTIFICARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO.

DEDICATORIA

A DIOS todopoderoso y Jesucristo bendito (con ÉL en la Paz y en la Gloria), sólo TÚ puedes tocar la melodía que nadie más puede, recibe esto como humilde ofrenda de superación, alabanza y perdón ante el gran peso de mis pecados; GRACIAS POR NUNCA ABANDONARME Y CREER EN MI; Oh DIOS, perdona la pobreza y puerilidad de nuestros corazones. Lodo Seas. Amén.

A mi Santa Madre, Olga Pita, por su incalculable e incondicional entrega, esfuerzo, amor, paciencia, tolerancia, apoyo, entendimiento e inspiración. Usted es la verdadera ingeniero y músico virtuoso detrás de toda mi lucha académica y cotidiana, recibe esto como un pequeño gesto de mi amor por ti pues nunca podré pagarte todas las apuestas que has hecho en mi y por mi.

A mi hermano César Alejandro Pita, que este corto ejemplo le motive a seguir adelante con sus propias metas y le inspire a tener fe en sus aptitudes para el desarrollo, extensión y cultivo de sus nobles destrezas como ser humano, profesional y ciudadano.

A mis amigos Ferddy Jesús Macadan Campos y Francisco Roberto Salazar Becker, quienes me han ayudado de forma incondicional, desinteresada y admirable no solo en mi preparación como Ingeniero Químico, sino en mi crecimiento espiritual como ser humano; chicos ustedes me graduaron!!! Gracias por tanta fe, tolerancia y soporte, por esto y más, éste trabajo va dedicado también a ustedes.

Con todo mi cariño, fe, admiración y eterno agradecimiento:

Ramón Alfredo Pita

DEDICATORIA

Ya no están a mi lado pero estoy segura que donde estén se alegran mucho de este logro que también es de Ustedes. Ustedes que sin saber leer ni escribir me educaron y formaron desde niña, y lo hicieron muy bien, siempre estaré orgullosa de ustedes mis amados abuelos: VICTOR MANUEL MILLAN, LUISA RODRIGUEZ Y MARIA DEL VALLE ROJAS.

A mis amadas princesas Ariadna Valentina y Andrea del Valle.

Con todo mi Amor para ustedes, los Amo.

Miliny Del Valle Rojas Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Comenzamos agradeciendo obviamente al MAESTRO DE MAESTROS, DIOS TODOPODEROSO. Antes de que yo me diera cuenta que necesitaba un salvador, ya lo tenía!!!, me enseñaste por la mejor vía de que no debemos insistir en lo que queremos hacer al punto de rehusar hacer lo que debemos hacer... aceptar tu voluntad a cada instante; me enseñaste por la mejor vía a trabajar como si todo dependiera de mi mientras rezaba como si todo dependiera de ti; quien honra a su maestro se honra a sí mismo, Oh Maestro Virtuoso, Ingeniero de Ingenieros, Músico de Músicos, reconozco tu presencia en mi corazón, te suplico nunca me abandones en la alegría, en la tristeza, en la angustia y en la certeza, en la escases y en la abundancia, en el silencio y también en la fiesta, permanece con mis sentimientos en todo momento, el cumplimiento de mis sueños sólo será para glorificarte.

A mi mama Olga Pita por estar siempre pendiente de mi como nadie, espero DIOS te permita vivir mucho tiempo para yo verte orgullosa por mis logros.

A mi querido Tío Miguel Ángel Ordáz por creer en mi como profesional, por ser una inspiración al logro empresarial, por su valiosa ayuda y contribución durante toda mi carrera universitaria.

A la Universidad de Oriente, institución que fue para mi un segundo hogar, a quién le debo tan valiosos recuerdos y tan hermosas amistades, me abrió las puertas a tantos conocimientos brindándome la oportunidad y el espacio para formarme profesionalmente.

A mis verdaderos amigos, colegas y hermanos Freddy Jesús Macadan Campos, Francisco Roberto Salazar Becker y Jesús Eduardo Fernández Mosquera principalmente por aceptarme como su amigo, por perpetuarse en mi vida enriqueciéndola con tantas vivencias inolvidables y por ser tan buenas personas con el prójimo.

A mis adorables e inolvidables compañeras de estudio de pregrado; Dayana Zamora, Mackglenys Gómez, Yetzania López, María Cecilia Granadino, Montieldhi Montilla, Dayana Aguilar y Marilyn Álvarez..... Chicas, ustedes fueron un tremendo equipo y agradezco a la vida por yo haber formado parte de ése equipo en nuestros últimos semestres; gracias por la tolerancia, ayuda, consideración y fraternidad que me regalaron.

A Karen Reyes, que también formó parte de ése maravilloso equipo final y quien fue una especial motivación para mi durante mi 8, 9 y 10 semestre, cómo me hubiéra encantado conocerte antes para haber tenido más tiempo gozando de tu amistad, me ayudaste mucho amiga, nunca te voy a olvidar!!

A Oriana Nathaly Carvajal Bermudes, Mi Oriiiiiiiiiinn!! Tu principal aporte hacia mi (y mágico) fue darme una amistad tan cariñosa, eres una amiga digna de conservar, aún así no se opaca el hecho de tu colaboración académica con éste loco a mediados de nuestra carrera, fuiste (y espero sigas siendo) un gran apoyo en mi vida, te recordaré siempre.

A Lourdarelys Astudillo, Lurdita fuiste gran colaboradora conmigo, también te acordaste de mi extendiéndome tu mano, herramientas y ánimos para reimpulsarme hacia delante durante etapas fuertes de nuestra carrera, así como yo, te agradecerán muchos porque eres muy servicial con todos aquellos(as) que te han necesitado.

A Damar Astudillo por su inmenso corazón, profesionalismo, educación, nobleza, tolerancia y humanismo, eres un ejemplo para mi, en poco tiempo te has ganado mi cariño y admiración, eres una amiga con toda la extensión de la palabra, te debo mucho mi rescatista estrella y sin duda lucharé para que nuestra amistad sea eterna.

A mis compañeros de pregrado y de Áreas de grado por tantas buenas vivencias: Kendel Capos (men, gracias por tu grande apoyo, fuiste y eres tremendo pana), Zoraida Castillo (gracias por creer en mi, tqm), Eileen Tovar, Krizia Lazzarini, Yolimar Paris (Yoli gracias por siempre ser tan amable), Guillermo Linero, Rosselyn Marcano (siempre tan servicial, mi cielo miles de besos para tí), Ana Maria, Marisela, Andrés Orozco, Inés Gómez (Peludissss,

gracias por todo ok? Jajaja), María Castillo (Gracias por tu inmensa y especial ayuda), Noeglys (Brillas como un lucerito gracias por tu amabilidad), Julio Mendoza, Fernando Rojas, César Augusto Michelangeli, Milinys Rojas y a los profesores Isvelia Avendaño, José Rondón, Jairo Uricare, Nelson Ferreira, Alexis Cova, Arturo Rodolfo, Shirley Marfisi, Ana Colmenares, Yuvi Moreno, Ronald Arias, Héctor Silva, Pascual Rodríguez, Francisco García, Fidelina Moncada, Yraima Salas, Frank Parra, María Dávila, Ismeira Velázquez y Rosa de Lara.

***A todos aquellos que contribuyeron con mi formación profesional
y personal... miles y miles de gracias.***

Ramón Alfredo Pita

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios Todo Poderoso y a mi Santísima Virgen Del Valle por darme fortaleza para continuar adelante y alcanzar mis logros.

A mis padres amados Armando Rojas y Nellys Rodríguez a quienes les debo mucho y la vida no me alcanzara para pagarles.

A mi esposo Ignacio Rodriguez por su fe en mí.

A la profesora Fidelina Moncada e Isvelia Avendaño por darme la oportunidad en la culminación de mi pregrado.

A mis compañeros de Áreas de grado Enidian, Celeste, Karen Digna y Ramón Pita por su apoyo en todo momento.

***Gracias con Todo Mi Corazón
Milinys Del Valle Rojas Rodriguez***

RESUMEN

En las últimas décadas ha crecido la industria petrolera en el mar, gracias a descubrimientos de nuevos y grandes yacimientos de petróleo costa afuera; la seguridad para trabajar en plataformas petroleras en ultramar es estricta debido a tantos equipos sensibles operando en tan poco espacio, esto acarrea un riesgo inherente tanto en la propia plataforma como en el pozo que se explora y produce, por esto, sumado a malas maniobras humanas, ha ocurrido explosiones, derrames, fugas y todo tipo de accidentes en plataformas petroleras como la Deepwater Horizon, éstos desastres petroleros suceden con relativa frecuencia, es por ello que surge la necesidad de investigar cuáles métodos son los apropiados para reducir la contaminación ambiental derivada de éstos accidentes, el presente trabajo toma como patrón de estudio la catástrofe de la plataforma Deepwater Horizon ocurrida el 20 de Abril de 2010, realizando un seguimiento documental de los hechos para formular propuestas de control de derrames de crudo y empleando una metodología estructural de matrices de evaluación y selección se escogieron los métodos más apropiados de cada una de las etapas fundamentales, los de mayor puntuación fueron el taponamiento con campana y cementación (ambos con 10/10) como métodos de eliminación de la fuente de contaminación; las barreras mecánicas (con 7,5/10) para contención de derrame; los recolectores de discos oleofílicos y recolectores de bomba (ambos con 10/10) para la recuperación de crudo derramado y la incineración “in situ” (con 7,5/10) como tratamiento químico, de ésta manera se aporta importantes nociones a la hora de elaborar un plan de contingencia que se aplique con mejor eficiencia, rapidez y con la mayor armonía posible con el ecosistema marino, en indeseables derrames de petróleo a futuro.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	xi
TABLA DE CONTENIDO	xii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Antecedentes	4
2.1.2 Condiciones y premisas	6
2.2 El Petróleo	7
2.3 Industria petrolera en el mar	8
2.3.1 Plataforma petrolera	8
2.3.1.1 Plataformas petroleras submarinas	10
2.3.1.2 Buques sonda	10
2.3.1.3 Plataformas sumergibles	11
2.3.1.4 Plataformas autoelevadoras	12
2.3.1.5 Plataformas flotantes semi-sumergibles	12
2.3.1.6 Barcazas	13
2.4 Descripción e historia de la Plataforma Deepwater Horizon	14
2.5 Derrame de petróleo	16
2.5.1 Factores que afectan a una mancha de petróleo	16
2.5.1.1 Evaporación	17

2.5.1.2	Disolución.....	17
2.5.1.3	Oxidación	18
2.5.1.4	Emulsificación	19
2.5.1.5	Sedimentación.....	20
2.5.1.6	Biodegradación	20
2.6	Toxicidad de los hidrocarburos	22
2.7	Efectos de recubrimiento o ensuciamiento con hidrocarburos	23
2.7.1	Consecuencias sobre el ambiente.....	24
2.7.1.1	Elementos abióticos	26
2.7.1.2	Elementos bióticos	26
2.7.1.3	Elementos socioeconómicos	28
2.8	Etapas fundamentales de control de derrame de crudo	29
2.8.1	Eliminación de la fuente	29
2.8.1.1	Cerrar pozos.....	30
2.8.1.2	Cerrar múltiples de producción.....	30
2.8.1.3	Desviar producción.....	31
2.8.1.4	Colocar grapas en las tuberías.....	31
2.8.1.5	Taponamiento con campana	31
2.8.1.6	Cementar el pozo fuera de control	32
2.8.1.7	Trasiego de tanqueros	32
2.8.2	Contención del derrame	33
2.8.2.1	Barreras mecánicas	34
2.8.2.1.1	Tipos de barreras mecánicas según su construcción.....	
		34
2.8.2.1.2	Comportamiento y limitaciones del uso de barreras mecánicas.....	
		35
2.8.2.1.3	Elementos de una barrera.....	
		36
2.8.2.2	Barreras neumáticas de aire	36
2.8.2.3	Barreras químicas (aglutinantes).....	36
2.8.2.3.1	Aplicación de aglutinantes	
		37
2.8.2.4	Barreras absorbentes.....	37

2.8.2.5 Barreras improvisadas	38
2.8.3 Recolección del derrame	38
2.8.3.1 Equipos recolectores de hidrocarburo en el mar	42
2.8.4 Deposición directa	43
2.10.5 Tratamiento químico:	44
2.8.5.1 Dispersantes	45
2.8.5.1.1 Tipos de dispersantes	46
2.10.5.1.2 Mecanismo de dispersión química	46
CAPÍTULO III	49
DESARROLLO DEL PROYECTO	49
3.1 Descripción de las condiciones actuales del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el golfo de México	49
3.1.1 Posibles causas del accidente	51
3.1.1.1 Fallas en los mecanismos de seguridad	51
3.1.1.2 Colocación del cemento	52
3.1.1.3 Centralizadores	52
3.1.1.4 Sistema de revestimiento	53
3.1.1.5 Sistema de válvulas de seguridad	53
3.1.2 Cronología de los hechos después del accidente	55
3.1.2.1 Semanas del 22 al 30 de abril	55
3.1.2.2 Semanas del 1 al 29 de mayo	56
3.1.2.3 Semanas del 1 al 30 de Junio	58
3.1.2.4 Semanas del 1 al 30 de Julio	60
3.1.2.5 Semanas del 1 al 30 de Agosto	62
3.2 Elaboración de propuestas para la minimización del derrame de crudo en función de las etapas fundamentales de control	63
3.3 Diferencia en la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo	67
3.3.1 De las propuestas de eliminación de la fuente	67
3.3.1.1 Apuntalamiento de pozos	67
3.3.1.2 Cerrar múltiples de producción	68

3.3.1.3 Desviar la producción o derrame.....	69
3.3.1.4 Grapas de seguridad.....	70
3.3.1.5 Taponamiento con campana.....	71
3.3.1.6 Cementación del pozo.....	73
3.3.1.7 Trasiego de tanqueros.....	74
3.3.2 De las propuestas de contención de crudo derramado.....	75
3.3.2.1 Barreras mecánicas.....	75
3.3.2.1.1 Elementos de una barrera.....	78
3.3.2.2 Instalaciones permanentes.....	79
3.3.2.3 Barreras neumáticas.....	81
3.3.2.4 Barreras sorbentes.....	84
3.3.2.5 Barreras improvisadas.....	86
3.3.3 De los equipos propuestos para la recolección de crudo.....	87
3.3.3.1 Recolector de discos oleofílicos.....	87
3.3.3.2 Recolector de cuerda oleofílica.....	88
3.3.3.3 Recolector de cinta oleofílica.....	90
3.3.3.4 Recolector de vertedero.....	91
3.3.3.5 Recolector de tambor oleofílico.....	92
3.3.3.6 Recolector de bomba.....	94
3.3.4 De las propuestas de tratamiento químico.....	95
3.3.4.1 Dispersantes.....	95
3.3.4.2 Aglutinantes.....	98
3.3.4.3 Aditivos biológicos.....	98
3.3.4.4 Combustión “in situ”.....	100
3.3.4.4.1 Agentes de combustión.....	102
3.3.4.5 Gelificantes.....	103
3.4 Seleccionar las propuestas más adecuadas para el control del derrame de crudo.....	104
3.4.1 Evaluación de las propuestas.....	104
3.4.2 Metodología.....	104

3.4.3 Metodología de análisis estructural para determinar y ponderar los factores que afectan a los métodos propuestos de control de derrame.....	106
3.4.3.1 Justificación de la ponderación de los factores	111
3.5.3.2 Escala de evaluación	112
3.4.4 Características de los métodos propuestos para la eliminación de la fuente, contención de crudo derramado, recuperación de hidrocarburos y tratamiento químico	112
3.4.4.1 Criterio de evaluación.....	113
3.4.5 Muestra de cálculo	115
CAPÍTULO IV.....	117
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	117
4.1 Descripción de las condiciones actuales del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el golfo de México.....	117
4.2 Elaboración de propuestas para la minimización del derrame de crudo en función de las etapas fundamentales de control.....	118
4.3 Diferencia en la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo.	119
4.4 Seleccionar las propuestas más adecuadas para el control del derrame de crudo.	119
4.4.1 Métodos seleccionados para controlar el accidente y reducir la contaminación.....	125
4.4.1.1 Análisis de los resultados	126
4.4.1.1.1 Métodos seleccionados para eliminar la fuente de contaminación	126
4.4.1.1.2 Método seleccionado para contener y concentrar la expansión del crudo derramado.....	127
4.4.1.1.3 Equipos seleccionados para la recuperación del crudo derramado.....	128
4.4.1.1.4 Método seleccionado como tratamiento químico ..	129
CAPÍTULO V.....	131

CONCLUSIONES y recomendaciones	131
5.1 Conclusiones	131
5.2 Recomendaciones	132
BIBLIOGRAFÍA.....	133
GLOSARIO	137
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:	140

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Un derrame de petróleo o marea negra es un vertido que se produce debido a un accidente u operación inadecuada que contamina el medio ambiente, especialmente el mar, con productos petroleros. Estos derrames afectan a la fauna y la pesca de la zona marítima o litoral afectado, así como a las costas donde con especial virulencia se producen las mareas negras con efectos que pueden llegar a ser muy persistentes en el tiempo.

La “Deepwater Horizon” es una plataforma petrolífera semi-sumergible de posicionamiento dinámico de aguas ultra-profundas construida en el año 2001. El 20 de abril de 2010 una explosión tuvo lugar en la torre de perforación de la plataforma provocando un incendio, varios barcos de apoyo se aproximaron al lugar del siniestro para intentar controlar el incendio mientras la plataforma se hundía. La Deepwater Horizon finalmente se hundió el 22 de abril de 2010, y se encuentra a una profundidad aproximada de 1.500 metros, sus restos se encontraron en el lecho marino desplazados a una distancia aproximadamente de 400 metros al noroeste del lugar donde se ubicaba el pozo.

El incontrolado derrame de petróleo, mezclado con una pequeña parte de gas metano, provocado por la dificultad de sellar varias fugas en las tuberías del fondo marino, amenaza el hábitat de cientos de especies marinas y de aves. Las cifras del derrame son inciertas, dependiendo de las fuentes estarían entre las 680 y las 11.600 toneladas diarias (1 barril de crudo estadounidense tiene 158.987 litros y su peso está entre los 119 y 151 Kg.). Desde el inicio del derrame hasta el 15 de mayo de 2010 (25

días) las cifras del derrame acumuladas variarían entre las 17.000 y las 290.000 toneladas. Si la fuga continúa y se confirman las cifras más negativas entre 56.000 y 84.000 barriles diarios, podría convertirse en uno de los mayores derrames de la historia.

Dos meses después del hundimiento, el derrame de crudo aún no había podido ser controlado, tuvieron que pasar alrededor de cinco meses para que el pozo fuera sellado de forma definitiva no sin antes haber dejado en el medio ambiente grandes daños. Conscientes de la situación crítica actual, de la frecuencia de éstos derrames de petróleo accidentales y en búsqueda de una solución que pueda minimizar los efectos causados por dichos derrames, se ha propuesto varias estrategias o métodos de control, basado en cuatro etapas fundamentales:

- Eliminación de la fuente.
- Contención.
- Recolección.
- Tratamiento químico.

La seriedad de éste problema da pie al desarrollo de éste proyecto que busca estudiar distintas opciones para el control de derrames de este tipo; recopilando, analizando y organizando toda la información necesaria a través de textos bibliográficos que permita describir las posibles causas, así como la situación actual de éste nefasto derrame. Conociendo las etapas fundamentales para el control de derrame de crudo se podrá facilitar propuestas de métodos para reducir lo máximo posible el daño causado y mediante un estudio comparativo de viabilidad y eficiencia, se seleccionarán aquellos métodos que sean más amigables con el ecosistema marino y asegure la mayor recuperación del petróleo derramado.

Debido a que estos accidentes ocurren con relativa frecuencia la elaboración de este proyecto aportará bases para el estudio y enfrentamiento de derrames de crudo en plataformas de ultramar, si llegasen a ocurrir en un futuro desastres ambientales similares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Comparar conceptualmente las estrategias o métodos para el control del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el Golfo de México.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Describir las condiciones actuales del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el Golfo de México.
2. Elaborar propuestas para la minimización del derrame de crudo en función de las etapas fundamentales de control.
3. Diferenciar la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo.
4. Seleccionar las propuestas más adecuadas para el control del derrame de crudo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

- **Mujica García M. (2007);** estudió la dispersión unidimensional de una mancha de hidrocarburo en agua de mar a través de la modificación de la ecuación de Blokker, a partir de las relaciones entre las fuerzas de dispersión involucradas. Se caracterizaron muestras de los crudos de Anaco Wax y Mesa 30 a 25° C, luego se produjeron las condiciones marítimas en un equipo experimental y se simuló un derrame para determinar la velocidad de dispersión y cambios en la mancha de crudo durante el proceso de envejecimiento. Los resultados obtenidos se correlacionaron con los diversos modelos propuestos mediante el programa estadístico SPSS versión 13.0, y se encontró que el crudo Anaco Wax se dispersa rápidamente, produce una mayor concentración de fracciones de hidrocarburos disueltos lo cual se relaciona con la menor viscosidad del crudo y su contenido de fracciones ligeras. [1]

- **Arcia, López, y otros, (Enero 2004);** realizaron un trabajo documental sobre la acción del petróleo derramado en el agua, su gran capacidad de contaminación, las medidas preventivas que se deben tomar y las acciones posteriores a la contaminación. El trabajo reúne informaciones planes de contingencia tomados en situaciones extremas y destacan algunos equipos implementados en la limpieza de las aguas. En este proyecto se adentran en los aspectos relacionados con los derrames petroleros, proceso nada simple que ha ocurrido a lo largo de los años, concluyendo que la tendencia que presenta el hombre para provocar accidentalmente dichos derrames

disminuirán pero no en su totalidad, por lo tanto deben aumentar las medidas preventivas y mucho más las medidas que controlan la contaminación de las aguas para de esta manera poder tener un mundo un poco mejor. [2]

- **Maestre, José A. (1999)**, realizó un estudio sobre la aceleración el proceso de biorremediación en derrames petroleros, mediante el uso de dispersantes de hidrocarburos. Se estudió el nivel de toxicidad de cinco dispersantes de hidrocarburos en juveniles de camarón empleándose bioensayos estáticos durante un periodo de exposición de 24 horas. Se determinaron los parámetros de pH, temperatura oxígeno disuelto y sólidos suspendidos. Los resultados obtenidos, luego de diversas pruebas, demuestran que el mejor dispersante utilizado fue el “Dispersante E” el cual se utilizó para la prueba experimental de biorremediación que consistió en ensayos realizados en un derrame de hidrocarburos en el Campo Dación, al sur del Edo. Anzoátegui. El Experimento duró 8 semanas en las cuales se cumplió con la normativa ambiental vigente para los parámetros adecuados: TPH, pH, RAS y arsénico (lixiviado), quienes sirvieron como medidas del proceso biodegradativo. Encontrándose que el dispersante utilizado acelera la biodegradación de los hidrocarburos totales (TPH), con un porcentaje de remoción del 89,58%, siendo el tratamiento con Súper 38 al 50% el que presentó el menor contenido de hidrocarburos totales presentes. [3]
- **Patete C. y Brito E. (1983)**; en ésta investigación se determina la contaminación por hidrocarburos en sedimentos marinos de la bahía El Chaure, identificando y cuantificando las fracciones de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos policíclicos, utilizaron técnicas analíticas como extracción Soxhlet con benceno – metanol para la extracción de compuestos orgánicos, cromatografía

de adsorción con empaque dual de alúmina sobre sílica-gel para la separación de fracciones de hidrocarburos alifáticos de los aromáticos policíclicos y cromatografía de capa fina para separar los compuestos aromáticos simples de los aromáticos policíclicos. [4]

2.1.2 Condiciones y premisas

Las características del crudo derramado derivado del siniestro ocurrido en la plataforma Deepwater Horizon varían conforme pasa el tiempo debido a la meteorización provocada por del medio ambiente, sin embargo, se estima que durante los meses de avería del pozo se derramaba al ambiente marino una gran cantidad de crudo que estuvo entre 35.000 y 60.000 barriles diarios, la presión del pozo fuera de control era de aproximadamente 6700 psi con un gradual incremento, la temperatura en la superficie del pozo a esas profundidades ronda entre 4 y 10 °C y los grados API del crudo derramado disminuían en un rango comprendido entre 40 y 20 °API debido a los efectos de la intemperie sobre él. A todas éstas la principal premisa de éste trabajo es estudiar todas éstas condiciones y sucesos donde se analicen, sistematicen e integren los resultados de investigaciones ya publicadas, sobre los diferentes tipos de métodos fundamentales de control de derrame de crudo que se han empleado en el pasado en accidentes de este tipo, así como técnicas modernas, con el fin de contar con una información sólida y útil para realizar las propuestas más adecuadas que se puedan aplicar para reducir el impacto ecológico y minimizar gastos económicos como también dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo en éste campo de planes de contingencia ante derrames petroleros.

2.2 El Petróleo

El petróleo ("aceite de roca") es una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo. Es de origen fósil, fruto de la transformación de materia orgánica procedente de zooplancton y algas que, depositados en grandes cantidades en fondos anóxicos de mares o zonas lacustre del pasado geológico fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos.

La transformación química (craqueo natural) debida al calor y a la presión durante la diagénesis produce, en sucesivas etapas, desde betún a hidrocarburos cada vez más ligeros (líquidos y gaseosos). Estos productos ascienden hacia la superficie, por su menor densidad, gracias a la porosidad de las rocas sedimentarias. Cuando se dan las circunstancias geológicas que impiden dicho ascenso (trampas petrolíferas como rocas impermeables, estructuras anticlinales, márgenes de diápiros salinos, etc.) se forman entonces los yacimientos petrolíferos.

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen), densidad (entre 0,75 g/ml y 0,95 g/ml), capacidad calorífica, etc. Estas variaciones se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla. El petróleo líquido puede presentarse asociado a capas de gas natural, en yacimientos que han estado enterrados durante millones de años, cubiertos por los estratos superiores de la corteza terrestre.

2.3 Industria petrolera en el mar

El primer descubrimiento de petróleo bajo el mar fue reportado hace 75 años más o menos, en aguas poco profundas frente a la costa de California, no fue sino hasta 1946 cuando se inició la exploración intensiva de las zonas costeras mundiales. Desde esa época se calcula que más de 16.000 pozos han sido perforados en plataformas continentales a profundidades mayores y a distancias cada vez más alejadas de la costa, lo cual confirma la aseveración de algunos investigadores de que la reserva mundial petrolera se reduce año con año, y que si en 1985 alcanzaría para 30 años de consumo, en el año 2000 sólo habrá para 20.

Las técnicas modernas permiten extraer petróleo crudo en aguas con profundidades que llegan a los 1000 metros y localizadas hasta a 100 kilómetros de la costa. La exploración ya está en marcha en las plataformas continentales de 75 países, 28 de los cuales están produciendo o están por producir petróleo crudo y gas submarinos.

2.3.1 Plataforma petrolera

Se denomina plataforma petrolífera al conjunto de las instalaciones ubicadas en los mares u océanos para extraer petróleo o gas natural del subsuelo marino. Entre las tareas que se desarrollan en estas plataformas destacan las operaciones de taladrar el subsuelo hasta alcanzar la zona donde se encuentra el petróleo o gas que pueden ser cientos de metros debajo del foso marino. Estas instalaciones son sumamente complejas y robustas para poder soportar los enormes embates que reciben del oleaje marino y soportar la maquinaria tan potente que albergan para poder extraer el petróleo o gas natural del subsuelo marino.



Figura 2.1 Plataforma Petrolera. [12].

En toda plataforma petrolífera se combinan gases, líquidos y vapores inflamables, por lo que es necesario proteger a los trabajadores que hay en las plataformas del riesgo de explosiones que existen. Tanto en la extracción de gas como de petróleo, sale mezclada con grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es el gas más comúnmente encontrado en el sistema de drenaje. A altas concentraciones de H_2S , puede causar daño a los ojos, al sistema nervioso y al sistema respiratorio. A una concentración de 50 ppm o mayor, el sistema respiratorio se paraliza y puede ocurrir la muerte.

En la mayoría de las plataformas petroleras hay alarmas que se activan al detectarse concentraciones desde 10 a 20 ppm de H_2S , las cuales ya son capaces de causar sintomatología y daños físicos. En los depósitos que hay en las plataformas para almacenar el petróleo y el gas recogido tienen sus espacios vacíos llenos de gases inertes como nitrógeno para aislarlos de gases explosivos como (H_2S) y benceno que son tremendamente peligrosos.

2.3.1.1 Plataformas petroleras submarinas

Las plataformas de perforación submarina disponen entre sí de unos elementos comunes, indispensables para cumplir su función. Por ello, el aspecto de todas es muy parecido: llevan una o dos torres de sondeo, e instalaciones de producción de energía y accionamiento, bombas y estanques del lodo de circulación; almacenes, talleres, laboratorio y oficinas. Además, alojamientos para el personal y pista para helicópteros, que garantizan su enlace con tierra firme.

La característica importante que sirve para clasificarlas es la forma como se fijan en el lugar de trabajo, pues mientras unas flotan y se fijan con anclas, otras se apoyan firmemente en el fondo del mar. Se pueden considerar los siguientes tipos: buques-sonda, plataformas sumergibles, plataformas autoelevadoras, plataformas flotantes semi-sumergibles y barcazas.

2.3.1.2 Buques sonda

Son embarcaciones en las que se monta la torre de perforación y se instalan los elementos y servicios necesarios, dejando sobre cubierta la pista para helicópteros; su ventaja principal es que pueden trabajar a grandes profundidades y su operación resulta la más económica en comparación con los demás métodos. Tienen gran libertad de movimiento porque sus desplazamientos son rápidos y poco costosos; sin embargo, presentan el inconveniente de su escasa estabilidad.



Figura 2.2 Buque Sonda [13].

2.3.1.3 Plataformas sumergibles

Están construidas sobre columnas con las que se apoyan en el fondo del mar. La maniobra de estas plataformas no es difícil y son estables al ser remolcadas, pero su transporte alcanza costos elevados sobre todo para distancias grandes; son apropiadas cuando desde un punto se efectúan varios sondeos con direcciones diferentes, de modo que no haya que cambiarlas de sitio con frecuencia: generalmente son utilizadas para calados de más de 50 metros.

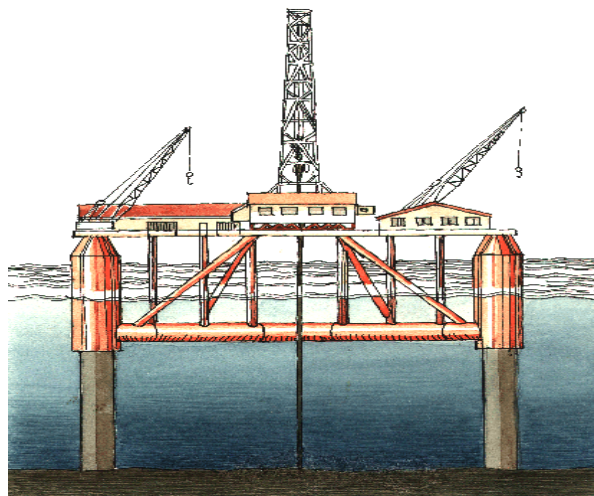


Figura 2.3 Plataforma sumergible [14].

2.3.1.4 Plataformas autoelevadoras

Las columnas llevan gatos que elevan a la plataforma, por lo que pueden ampliar su calado hasta 90 metros; son de difícil transporte y generalmente se utilizan en estaciones desde las que se efectúan varios sondeos con una campaña de larga duración.



Figura 2.4 Plataforma autoelevadora [15].

2.3.1.5 Plataformas flotantes semi-sumergibles

Cuentan con columnas que están unidas a unos grandes cilindros o pontones con armaduras, situados alrededor de la plataforma, y hacen las veces de flotadores que pueden llenarse de agua a voluntad para conseguir la altura adecuada para el trabajo, de acuerdo con la intensidad del oleaje. La parte inferior con los pontones queda sumergida, de modo que el conjunto se estabiliza mejor, aunque se trabaje en zona de fuerte oleaje.

Las estructuras más altas de estas plataformas llegan a 40 metros; sin embargo, si se colocan parcialmente sumergidas se puede trabajar sobre los 150 metros. Resulta poco económico desplazarlas a distancias

grandes, por lo que son apropiadas para realizar sondeos de exploración localizados en distancias cortas.



Figura 2.5 Plataforma Semi-sumergible [16].

2.3.1.6 Barcazas

Son embarcaciones de fondo plano sobre las que se montan las torres de sondeo y los servicios, llegando a sumergirse un poco al llenar de agua los tanques de inmersión, de modo que en lugares con poca profundidad se pueden apoyar sobre el fondo del mar y cuando flotan trabajan hasta a 20 metros.

Las plataformas semi-sumergibles permiten perforar a cualquier profundidad, pero en la práctica se limitan a 200 metros, porque la inmovilidad lateral no es suficiente para fondos mayores. Estas plataformas son más eficientes cuando se las estabiliza en el momento de la perforación mediante anclas y procedimientos automáticos basados en localizaciones y marcaciones con el radar y el sonar. [5].



Figura 2.6 Barcaza [17].

2.4 Descripción e historia de la Plataforma Deepwater Horizon

Deepwater Horizon es una torre petrolífera de diseño RBS-8D de quinta generación, semi-sumergible, de posicionamiento dinámico y de aguas ultra-profundas, cuyos taladros perforaban el lecho marino, mientras que otro tipo de torres y plataformas son utilizadas para extraer petróleo de pozos ya taladrados. La torre tenía 121 metros de largo por 78 metros de ancho y, de acuerdo a las declaraciones de Billy Nungesser, presidente de la Parroquia de Plaquemines, Luisiana, era una de las torres de perforación más grandes de aguas profundas. Podía operar en aguas de hasta 2.400 metros de profundidad y tenía una profundidad máxima de perforación de 9.100 metros. La torre podía alojar hasta 130 miembros de la tripulación.

Diseñada originalmente para R&B Falcon, *Deepwater Horizon* fue construida por Industrias de construcción pesada de la Hyundai en Ulsan (Corea del Sur). Su construcción comenzó en diciembre de 1998 y fue entregada en febrero del 2001 después de la compra de R&B Falcon por Transocean. Fue la segunda torre petrolífera construida de una clase de dos, aunque la *Deepwater Nautilus*, su predecesora, no tenía

posicionamiento dinámico. Después de arribar al golfo de México, *Deepwater Horizon* fue utilizada bajo contrato por BP Exploration. Su trabajo incluía la perforación de pozos petrolíferos en los yacimientos Atlantis y Thunder Horse, un descubrimiento del 2006 en el yacimiento Kaskida y en el yacimiento Tiber en el 2009.

El 2 de septiembre de 2009, *Deepwater Horizon* perforó en el yacimiento Tiber el depósito de petróleo y gas más profundo hasta el momento, con una profundidad vertical de 10.685 metros, de los cuales 1.259 m eran agua. En el 2002 la plataforma fue actualizada con "e-drill", un sistema de monitoreo de perforación con el que, técnicos en Houston, Texas, recibían información en tiempo real del proceso de perforación de la torre, así como información sobre mantenimiento e informes de errores.

Antes del accidente, *Deepwater Horizon* trabajaba en el Cañón Mississippi de BP, en el bloque 252, conocido como el prospecto Macondo. La torre se encontraba a 80 kilómetros de la costa sureste de Luisiana. En octubre de 2009 BP extendió el contrato por tres años más, los cuales se contarían a partir de septiembre de 2010. Se estima que el contrato de arrendamiento representaba la cantidad de 496.800 dólares al día. [6].



Figura 2.7 Plataforma Deepwater Horizon antes del accidente [18].

2.5 Derrame de petróleo

Se trata de petróleo descargado accidentalmente, intencionalmente, o que flota de manera natural en la superficie de los cuerpos de agua como masa discreta llevada por el viento, por las corrientes y las olas. Puede controlarse por medio de la dispersión química, la combustión, contención mecánica y adsorción. Estos derrames tienen un efecto destructivo sobre la vegetación y la fauna de las aguas así como de sus costas. [7]



Figura 2.8 Derrame de Petróleo en el mar [19].

2.5.1 Factores que afectan a una mancha de petróleo

Un derrame de petróleo lleva consigo una serie de cambios progresivos de sus propiedades físico-químicas los cuales se atribuyen al proceso de intemperización, el cual incluye: evaporación, disolución, dispersión, oxidación, emulsificación, sedimentación y biodegradación.

La intemperización (o meteorización) es la pérdida de ciertos componentes del petróleo a través de una serie de procesos naturales que comienzan una vez que ocurre el derrame y continúan

indefinidamente. La tasa de intemperización del petróleo varía en función de las características del producto derramado y de las condiciones climáticas existentes en el lugar del derrame.

2.5.1.1 Evaporación

Este proceso afecta la composición del producto derramado: aumenta su densidad y viscosidad y decrece su solubilidad en el agua, reduciendo así el nivel de toxicidad del producto. En la medida que los compuestos más volátiles se evaporan, el petróleo se hace más pesado y puede llegar a hundirse. A las 24 horas casi el 40% del petróleo se ha evaporado.

Estos porcentajes van variando de acuerdo al grado de viscosidad del hidrocarburo, por lo que el proceso de evaporación juega un papel muy importante en los derrames, en especial cuando se trata de gasolinas o crudos livianos.

2.5.1.2 Disolución

Este proceso, también llamado solución es aquel por el cual las fracciones ligeras de los hidrocarburos y componentes polares, se disuelven en el volumen de la columna de agua y en los alrededores del derrame. La velocidad de disolución depende de la composición, tasa de esparcimiento, temperatura del agua, turbulencia y grado de dispersión.

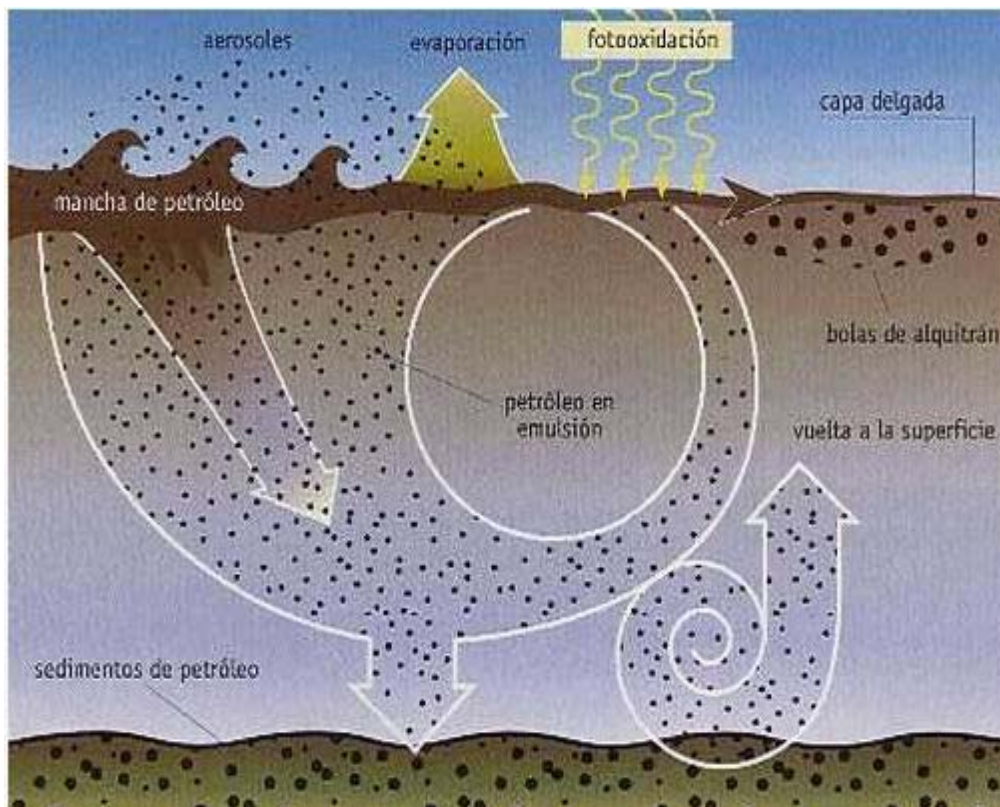


Figura 2.9 Factores que afectan a una mancha de petróleo [20].

Aunque el proceso comienza inmediatamente, es de largo plazo y continúa durante todo el proceso de degradación del hidrocarburo. Es de notar que los compuestos más ligeros son los más solubles en el agua y por lo tanto se convierten en los más tóxicos, por lo que es muy importante calcular su concentración, para estimar los posibles efectos tóxicos. La disolución tiene efectos mínimos, y se acelera utilizando catalizadores (fertilizantes como nutrientes para las bacterias: nitratos y fosfatos).

2.5.1.3 Oxidación

Es la combinación química de hidrocarburos con el oxígeno atmosférico y contribuye a la descomposición o degradación final del petróleo. Cuanto más área expuesta exista, mayor será la oxidación y

mayor la velocidad de degradación. Este proceso es lento puesto que sólo una pequeña cantidad de oxígeno puede penetrar en una mancha de petróleo. La radiación ultravioleta solar produce la oxidación fotoquímica que puede implicar una degradación diaria del 1% del derrame, dependiendo de la intensidad de la radiación solar.

2.5.1.4 Emulsificación

Este es el proceso por el cual un líquido se dispersa en otro líquido en forma de pequeñas gotitas, es decir como suspensión. En el caso del petróleo existen 2 tipos:

- **Petróleo en agua**

Pueden ser fácilmente dispersas por las corrientes y la agitación superficial. La formación natural de estas emulsiones resulta muy positiva debido a que acelera los procesos de disolución, foto-oxidación y biodegradación. Precisamente esto es lo que se pretende al aplicar dispersantes a un derrame.

- **Agua en petróleo**

Se forma cuando se mezcla agua con petróleo viscoso o asfáltico por acción de las olas. Es muy estable y puede durar meses o años.

Las emulsiones que contienen de 30% a 50% de agua, tienden a fluir como el petróleo, mientras que las que contienen del 50% al 80% son las más comunes, tienen color café y la consistencia de la grasa. Se les denomina como "Mousse de chocolate" y solo se forman en fuerte oleaje y petróleo de alta viscosidad y alta gravedad específica. La degradación de este tipo de emulsión es muy lenta y solo puede ser acelerada por la presencia de cierto tipo de bacterias dentro de la emulsión.

2.5.1.5 Sedimentación

Puede suceder por dos mecanismos: el primero se define en la medida que el hidrocarburo se intertemperiza resultando en un incremento de su densidad respecto al agua circundante y por consiguiente se hunde. El segundo ocurre por la adhesión de las partículas suspendidas en la columna de agua al petróleo. El aumento de la densidad de petróleo por evaporación es sólo efectivo en mar abierto, donde la densidad del crudo sea muy cercana a la del agua de mar.

2.5.1.6 Biodegradación

Este es el proceso por el cual la mancha desaparece del medio ambiente. Ciertas especies de bacterias marinas, hongos y otros organismos utilizan los hidrocarburos como fuente de alimento. Es un proceso natural y muy lento debido al agotamiento continuo de oxígeno y a la formación de emulsiones de agua en petróleo (mousse), etc.

La tasa de biodegradación depende del contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo), oxígeno disuelto, salinidad, área superficial del derrame y de la composición y tamaño de la población microbiana. En condiciones óptimas de aguas bien oxigenadas y con temperaturas entre 20 y 30°C, las bacterias pueden descomponer hasta 2 gr/m² de petróleo por día.

La evaporación de los hidrocarburos es uno de los factores principales para determinar el destino final del derrame. Durante las primeras 24 horas la evaporación es responsable por la pérdida de los hidrocarburos de tamaño C₆ a C₁₃ (alcanos de 6 a 13 carbonos) dependiendo del tipo de hidrocarburo, aproximadamente 25-50% de los hidrocarburos derramados pueden llegar a evaporarse.

Una fracción de los hidrocarburos derramados se disuelve en la columna de agua. Generalmente esta parte es una pequeña fracción del total derramado, aunque representa una fracción clave desde el punto de vista de toxicidad. La posibilidad de toxicidad a la fauna acuática principalmente es causada por esta fracción. Muchos de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), sustancias de reconocida toxicidad, forman parte de la fracción disuelta.

Los hidrocarburos más pesados que no se disuelven o evaporan pasan a emulsificarse y a sedimentarse. Una vez que los hidrocarburos se emulsifican es difícil tratarlos químicamente, y pueden llegar a mezclarse completamente con la columna de agua. Los hidrocarburos pesados pueden permanecer dispersos en la columna de agua, pero últimamente se sedimentan al fondo incorporándose con los sedimentos marinos. Esta parte del derrame representa una fuente de contaminación potencial de larga duración. Los hidrocarburos que alcanzan las playas se mezclan con la arena, o pueden retornar nuevamente al mar por la acción dinámica de las olas y depositarse en el fondo. Estas fracciones de hidrocarburos por lo general tienen baja toxicidad pero pueden ocasionar efectos físicos, tales como cubrir y ensuciar las aves y otras formas de vida marina. Los hidrocarburos que permanecen en las playas también afectan la utilización de las mismas como zonas de recreación.

Los procesos de biodegradación últimamente oxidarán los hidrocarburos remanentes. Este proceso en general es lento y por lo tanto no del todo eficaz en eliminar los hidrocarburos pesados. Consecuentemente, la parte del derrame que no se disipa, elimina o trata artificialmente puede permanecer en el ambiente por muchos años.

2.6 Toxicidad de los hidrocarburos

La toxicidad de los hidrocarburos a la vida marina se presenta por dos vías: 1) ingestión o inhalación directa lo cual ocasiona efectos tóxicos agudos o crónicos, o 2) recubrimiento físico directo de los organismos. Los peces y otros organismos subacuáticos son las más susceptibles a los componentes tóxicos de los hidrocarburos. Los organismos litorales resultan más vulnerables a los efectos físicos del derrame (recubrimiento) que a la toxicidad aguda. Las aves, los mamíferos marinos, y las tortugas típicamente resultan afectadas de esta última manera.

El petróleo y sus productos derivados están compuestos una mezcla de hidrocarburos individuales, destacándose los compuestos parafinados, nafténicos y aromáticos. La composición porcentual de los componentes principales varía de acuerdo al origen de los hidrocarburos. Por ejemplo, un crudo típico de peso moderado (Prudhoe Bay en Alaska, peso API de 27.8), presenta una composición (en base al volumen) de: 27% parafinas, 37% naftenos, 25% compuestos aromáticos, y 11% otros compuestos. La toxicidad de la mezcla de hidrocarburos típicamente aumenta en función del contenido de compuestos aromáticos y los naftenos.

Debido a su naturaleza lipofílica muchos de los componentes de los hidrocarburos pueden ser bioacumulados por los organismos marinos (es decir que se almacenan en los tejidos del organismo). Cuando la exposición ocurre a bajas concentraciones los hidrocarburos acumulados pueden ser metabolizados y/o depurados a través de los mecanismos fisiológicos de los organismos. El proceso bioacumulativo puede resultar en peces y moluscos de valor comercial con alto nivel de contaminación no apto para el consumo humano aunque el ambiente mismo no presente alto grado de contaminación. En el caso de concentraciones ambientales

altas de hidrocarburos los efectos sobre los organismos son de tipo agudo o sub-agudo.

Los naftenos son una subclase de los compuestos aromáticos generalmente encontrados en alta concentración en los hidrocarburos, los componentes de hidrocarburos de mayor toxicidad incluyen los naftenos. Los naftenos son compuestos aromáticos policíclicos que se caracterizan por ser ligeramente solubles en agua y por lo tanto tóxicos a la vida marina en concentraciones de partes por mil millones.

La mayor parte de los hidrocarburos en el derrame permanecen en la superficie, y solo una pequeña fracción entra a la columna de agua. Los métodos mecánicos de respuesta por tanto son los preferidos para recuperar el hidrocarburo derramado (aunque este tipo de respuesta resulta inefectivo cuando se trata de derrames de gran magnitud). En los últimos años el uso de dispersantes ha ganado aceptación alrededor del mundo como alternativa aceptable para desagregar la mancha antes de que alcance las zonas costeras. Su uso puede constituir una estrategia clave para reducir impactos potenciales a poblaciones sensibles tales como aves y mamíferos marinos. Cabe destacar que los dispersantes pueden causar un aumento en el volumen de la fracción que se dispersa o disuelve en la columna de agua, incrementando la probabilidad de efectos tóxicos sobre las especies pelágicas (como los peces). Este posible efecto negativo asociado con el uso de dispersantes debe ser medido contra los beneficios potenciales que resultan al evitarse que la mancha de hidrocarburos alcance la costa.

2.7 Efectos de recubrimiento o ensuciamiento con hidrocarburos

Los organismos más sensibles al recubrimiento físico con hidrocarburos son las aves y los mamíferos marinos (lobos marinos,

ballenas, delfines). La sensibilidad es especialmente alta cuando un derrame ocurre en zonas de reproducción o criaderos de aves o mamíferos marinos; playas y costas usadas para la alimentación; y zonas de congregación. Estas actividades son estacionales, por lo cual es de importancia distinguir y determinar la temporada de presencia y/o anidamiento de especies migratorias y residentes.

El recubrimiento ocurre cuando las aves se zambullen durante las actividades de alimentación, o cuando mamíferos marinos emergen a la superficie del agua para respirar. Durante la temporada reproductiva es posible que aves con plumas contaminadas con hidrocarburos afecten a las crías o a los huevos cuando regresen recubiertos al nido desde zonas afectadas por el derrame. Sin embargo, el efecto inmediato principal del recubrimiento para las aves adultas es la pérdida de la capacidad termorreguladora, lo que en climas fríos puede rápidamente causar la muerte.

En los mamíferos marinos los hidrocarburos pueden causar irritación a las vías respiratorias, los ojos u otras membranas. El efecto no es necesariamente inmediato, pero el efecto sub-letal acumulativo es de aumentar la susceptibilidad a infecciones y a la disminución en la capacidad para conseguir alimento.

2.7.1 Consecuencias sobre el ambiente

Un derrame o descarga de hidrocarburo afecta básicamente a tres elementos del ambiente, los cuales son:

- Elementos abióticos (mares, suelos, formaciones del relieve, geomorfología, etc).
- Elementos bióticos (flora y fauna).

- Elementos socioeconómicos (actividades humanas, pesca, agricultura, lugares de esparcimiento de clubes, de recreación, de turismo, etc).

Los daños producidos por un derrame al ambiente son:

- **Físicos**

Al modificar la temperatura y transparencia del agua e interferir en los procesos geomorfológicos de las costas.

- **Químicos**

Al incorporar al agua, hidrocarburos y otros componentes tóxicos, cambiando así su composición, a la vez de disminuir el oxígeno disuelto en el agua.

- **Biológicos**

Al afectar algunas comunidades de organismos marinos, la flora y la fauna que habitan en la línea costera.

- **Sociales**

Al modificar el modo de producción de los habitantes de los poblados costeros, debido a alteraciones en las zonas pesqueras, áreas turísticas y recreacionales.

- **Económicos**

Al considerar el valor intrínseco del petróleo derramado, además de los efectos que este tiene en el agua que es usada por industrias ribereñas y la actividad turística.

2.7.1.1 Elementos abióticos

El petróleo contamina el suelo por su presencia y su permanencia en él. Esto depende del tipo de suelo lo cual es un producto de su composición y textura (tamaños de las partículas que lo forman) ya que según las características del suelo el petróleo se adherirá o penetrará con mayor o menor fuerza y por lo tanto permanecerá mayor o menos tiempo en ese ambiente. En general se puede afirmar que:

- En suelos arenosos (suelos de grano grueso); el petróleo penetra con mayor rapidez, en mayor cantidad y a mayor profundidad (llega hasta la napa freática).
- En suelos arcillosos o rocosos (suelos de grano fino); el petróleo no penetra con facilidad, penetra en poca cantidad y a poca profundidad y por ende se retira mediante recojo y/o lavados de manera rápida, por ejemplo, las playas arcillosas de la selva.
- En suelos con alto contenido de materia orgánica el petróleo se adhiere fuertemente a las partículas y restos vegetales de tal manera que permanece por más tiempo en el ambiente por ejemplo, en suelos de manglares y pantanos.
- Sobre formaciones de relieve: el petróleo por gravedad, se acumulará en lugares de hondonada, por ejemplo, en el fondo de una quebrada, y tenderá a no permanecer en elevaciones como las lomas o cerros. Asimismo el petróleo afectará más a un lago que a un desierto. En zonas costeras el crudo permanecerá por más tiempo en bahías que en playas abiertas.

2.7.1.2 Elementos bióticos

- Sobre la Flora: el petróleo se adhiere a las hojas y tallos de las plantas impidiendo el vital intercambio gaseoso (respiración y fotosíntesis) y la captación de energía solar. En el suelo, el petróleo satura los espacios aéreos desplazando al oxígeno necesario para la vida de las raíces.

Además, algunos compuestos del crudo, como los hidrocarburos aromáticos son tóxicos directamente para las plantas al encontrarse en exceso, situación que se produce en un derrame. En los cuerpos de agua el crudo impide la fotosíntesis de las algas del fitoplancton al formar una barrera opaca que impide el ingreso de los rayos solares en el agua, hecho que produce la muerte de estos organismos.



Figura 2.10 Derrame petrolero afectando a la flora [21].

- Sobre la Fauna: quizás lo más impresionante de los derrames de petróleo es la trágica visión que adoptan las aves marinas embadurnadas con crudo, las aves y los mamíferos en general, animales que poseen plumas y pelo respectivamente se ven afectados de dos maneras al ser cubiertos por petróleo.
- El petróleo al pegarse a las plumas o pelos, impide que éstos cumplan sus funciones naturales, de forma tal que el pelaje y el plumaje pierden su capacidad de aislantes térmicos y de aislantes del agua hecho que para animales acuáticos es mortal, pues pueden morir ahogados o por hipotermia (condición anormal que se produce cuando la temperatura corporal baja a valores menores que los mínimos vitales por pérdida de calor)



Figura 2.11 Ave marina cubierta de crudo [22].

- Efecto tóxico. Los animales manchados con petróleo se limpian el plumaje o pelaje lamiéndoselos, llegando a intoxicarse con el hidrocarburo, con consecuencias tóxicas para el sistema nervioso.

Los elementos bióticos de los ecosistemas marinos pueden dividirse en términos generales, en siete clases de organismos fitoplancton, zooplancton, fitobenton, zoobenton, peces, animales de sangre caliente y microorganismos. Estos organismos se clasifican de acuerdo a la función que desempeñan en la cadena alimentaria es decir, de acuerdo a sus respectivos nichos ecológicos, así por ejemplo, los peces pueden ser bénticos (si viven cerca del fondo) o pelágicos (si cumplen sus funciones en la columna de agua cercanas a la superficie).

2.7.1.3 Elementos socioeconómicos

La utilización que el ser humano realiza de los diferentes lugares del paisaje para llevar a cabo sus diversas actividades determina la existencia de daños que el petróleo derramado puede producir al llegar a dichas zonas. Además de los perjuicios económicos y los efectos tóxicos que el petróleo derramado puede causar, es muy común que se produzca escándalo y se genere mala publicidad que, personas con conocimientos

superficiales y con interés creados pueden utilizar para presionar a la Empresa Petrolera con el fin de obtener beneficios personales.

Los factores determinantes de la extensión de los efectos producidos de un derrame son el tipo de petróleo o derivado (ligero o pesado) y la estación del año. El petróleo pesado es más persistente sobre la superficie del agua que el ligero que se evapora rápidamente. Por eso es importante conocer las propiedades físicas y químicas del petróleo que se está transportando para tomar las decisiones adecuadas conducentes a resolver el problema inmediatamente con una técnica u otra.

2.8 Etapas fundamentales de control de derrame de crudo

2.8.1 Eliminación de la fuente

Constituye la serie de acciones de tipo operacional tendentes a impedir que el petróleo continúe fluyendo sin control hacia el exterior del pozo o de la instalación que lo transporta o almacena, con el objeto de minimizar las pérdidas de producción. Las acciones más comunes para eliminar la fuente de un derrame de petróleo son:

- Cerrar pozos.
- Cerrar múltiples de producción.
- Desviar producción.
- Colocar grapas en las tuberías.
- Taponamiento con campana.
- Cementar el pozo fuera de control.
- Trasiego de Tanqueros.

2.8.1.1 Cerrar pozos

Cuando ocurre un derrame de crudo el primer paso suele ser cerrar todas las válvulas de flujo y de seguridad siempre y cuando el accidente de tiempo a ello, pero cuando el derrame es brusco durante las primeras horas del siniestro, una de las acciones más efectivas es realizar un apuntalamiento al pozo, que consiste en introducir tubos de metal en la perforación hecha anteriormente a modo de evitar filtraciones del yacimiento al exterior, conjuntamente otra de las misiones de estos recubrimientos es la de mantener la integridad del pozo perforado y que no se derrumben algunas de sus paredes. Este procedimiento representa una respuesta rápida que permite mantener la integridad de la formación rocosa del pozo mientras se preparan las estrategias para su sellamiento definitivo.

2.8.1.2 Cerrar múltiples de producción

Los múltiples de producción y de prueba se utilizan para recolectar la producción de varios pozos a una planta centralizada donde los pozos pueden ser colocados individualmente en producción y/o prueba. Pueden ser operados manualmente o automáticamente con válvulas y con contadores de tiempo automáticos. Los múltiples de producción y prueba pueden ser diseñados para los grados ANSI y API, para varias presiones y varios tamaños de tubos.

El múltiple facilita el manejo de la producción total de los pozos que ha de pasar por los separadores como también el aislamiento de pozos para pruebas individuales de producción. Por medio de las interconexiones del sistema y la disposición apropiada de válvulas, se facilita la distribución, el manejo y el control del flujo de los pozos. Cuando ocurre un derrame debe cerrarse, además del pozo, los múltiples de

producción, estos son construidos de manera tal, que permitan desviar la corriente total de producción de un pozo cualquiera hacia un separador de pruebas con el objeto de poder cuantificar su producción.

2.8.1.3 Desviar producción

En éste proceso se suele hacer la perforación de un pozo de alivio cercano al pozo siniestrado, a través de perforación direccional por ejemplo, y de esta manera desviar la cantidad de hidrocarburos hacia un pozo controlado, el principal objetivo de éste método es reducir lo máximo posible la tasa de derrame mientras se hacen las operaciones de cementación del pozo.

2.8.1.4 Colocar grapas en las tuberías

Cuando el derrame proviene de una tubería rota de fácil acceso, se puede optar por adaptar una grapa especial de seguridad mediante llave de tuercas a una sección de la tubería anterior a la rotura para cerrar abruptamente el derrame, se usan distintos tipos de grapas dependiendo si el derrame es terrestre o acuático; este método se realiza generalmente mientras se procede con las demás reparaciones necesarias para solucionar definitivamente el problema de derrame.

2.8.1.5 Taponamiento con campana

Éste proceso es relativamente nuevo en comparación con los demás, se ha aplicado poco debido a que sólo es viable cuando el derrame proviene de pozos ubicados en el mar a gran profundidad, consiste en hacer descender controladamente una campana muy pesada colocándola sobre la fuga de crudo, ésta contiene una serie de válvulas y se adhiere al lecho marino por gravedad o cementación, el propósito de

ésta acción es taponar la fuga mientras se va recuperando el crudo a través de mangueras conectadas a la campana hasta los buques.

2.8.1.6 Cementar el pozo fuera de control

La cementación de un pozo tiene varios fines, desde el punto de vista de controlar un derrame se refiere a sellar el pozo colocando una columna de cemento en el hoyo abierto o revestido. El tiempo de fraguado después de la colocación de un tapón de cemento varía de 8 a 72 horas, según el uso de aceleradores o el tipo de pozo, éste proceso es el que logra sellar un pozo definitivamente sin embargo se ha demostrado que en determinadas situaciones, como fluctuaciones muy bruscas de temperatura o de presión, atentan contra la integridad de la adherencia del cemento.

La planificación de la cementación y el empleo del tipo de cemento adecuado debe tener en cuenta información sobre referencia de pozos vecinos, geometría del hoyo (forma, diámetro), si la operación se llevará a cabo en tierra o en el mar y la historia geológica (por ejemplo, si existieron problemas durante la perforación y tipo de conflictos), etc.

2.8.1.7 Trasiego de tanqueros

Cuando el derrame proviene de un buque petrolero, esta opción de eliminar la fuente del derrame consiste en trasegar los hidrocarburos contenidos en el buque accidentado hacia un buque de almacenaje vacío, disminuyendo gradualmente el contenido de hidrocarburos que pueden llegar al mar, el proceso se realiza hasta vaciar los tanques del buque dañado. También suelen trasegarse el combustible del buque para evitar explosiones durante potenciales incendios o vertidos de combustibles en el mar.

2.8.2 Contención del derrame

El petróleo derramado en un medio acuático, tiende a extenderse formando una delgada película superficial que cubre un área considerable y su limpieza resulta muy difícil. Además por efectos de los vientos y corrientes, la mancha se desplaza pudiendo alcanzar zonas críticas. En consecuencia, la contención y concentración del derrame es fundamental, aunque algunas veces no es posible debido a las condiciones ambientales. La contención del petróleo, en el más amplio sentido, puede efectuarse con tres propósitos principales:

- Mantener el petróleo en un lugar determinado.
- Mantener el petróleo alejado de un área determinada.
- Dirigir el petróleo hacia un punto determinado.

El tipo de derrame se refiere a la naturaleza de la descarga de petróleo. Puede tratarse de una descarga única, descargas múltiples o una descarga continua desde un buque o plataforma de perforación. Las condiciones ambientales cubren aspectos tales como el viento, el oleaje, las corrientes, la temperatura, etc. La contención y concentración de un derrame de petróleo es fundamental y estas acciones deben ser efectuadas con métodos adecuados y muy comunes, tales como:

- Barreras mecánicas.
- Barreras neumáticas o de aire.
- Barreras químicas.
- Barreras absorbentes.
- Barreras improvisadas.

Es importante destacar que el equipo de contención de derrame de petróleo que ha sido más utilizado es la barrera mecánica, pero el éxito

sólo se ha logrado en aguas tranquilas y derrames relativamente medianos, ya que la recolección y aún la contención son imposibles por medios mecánicos con olas por encima de 2.5m y en muchos caos con olas de 1.5m con mar muy movido.

Una segunda limitación es la velocidad de la corriente, ya que una velocidad mayor de 0.75 nudos arrastra el derrame por debajo de la barrera. La contención del petróleo es solamente una fase, tal vez la más importante de una operación completa, es por ello, que en las labores de control de un derrame de petróleo se pueden utilizar simultáneamente diferentes técnicas y equipos.

2.8.2.1 Barreras mecánicas

Es un equipo mecánico o físico que se extiende sobre y por debajo de un cuerpo de agua con el objeto de contener, confinar y cercar el petróleo derramado y realizar inmediatas acciones de recuperación de dicho derrame.

2.8.2.1.1 Tipos de barreras mecánicas según su construcción

Se pueden clasificar en dos grupos: tipo valla y tipo cortina. Las barreras mecánicas tipo valla son construidas de material semi-rígido o rígido, tienen una pantalla vertical donde están acoplados los flotadores; y los elementos de lastre están colocados en la parte inferior de la pantalla. De acuerdo al fabricante, este tipo de barrera vienen almacenados en cajas, el componente principal o pantalla está enrollado formando carretes y los implementos complementarios como son los elementos flotantes, lastre y accesorios auxiliares son almacenados en sacos. Estos elementos son ensamblados por el usuario.

Las barreras mecánicas tipo cortina son construidas de material más flexible, con un elemento flotante continuo unido a una falda o faldón y los pesos de lastre colocados en su parte inferior. Algunas de estas barreras son infladas con aire antes de su despliegue y vaciadas cuando son recogidas. Una ventaja de este tipo de barrera es que permite almacenar mayor longitud, pero es necesario contar con un equipo auxiliar para llenar de aire el elemento flotante. Otra ventaja es que se puede aumentar la flotabilidad de la barrera introduciendo más aire al elemento flotante, lo cual hace que mejore las características de contención en condiciones ambientales adversas.

2.8.2.1.2 Comportamiento y limitaciones del uso de barreras mecánicas

La capacidad de una barrera mecánica para contener y cercar un derrame de petróleo en un cuerpo de agua, está determinado por las condiciones hidráulicas y los efectos físicos que actúan sobre la barrera. El efecto de las corrientes sobre un derrame es directo, razón por la cual el derrame navegará a la misma velocidad que la corriente del agua, el viento mueve el derrame aproximadamente al 0.03% de su velocidad. Debido a ello, si la velocidad de la corriente es muy fuerte, la porción sumergida (falda) de la barrera tratará de deflectarse y el petróleo pasará por debajo cuando la velocidad del agua sea de 0.30 m/seg (0.6 nudos) y cuando exista la suficiente profundidad del agua.

En el caso contrario, cuando la profundidad del agua es poca, por ejemplo dos veces la parte sumergida de la barrera, la velocidad del agua también se duplicará (0.6 m/seg). Idealmente la profundidad del agua por debajo de la barrera debe ser como mínimo cinco veces la parte sumergida de una barrera grande.

2.8.2.1.3 Elementos de una barrera

Un medio de flotación, incluye un francobordo (vela), para contener el petróleo y evitar, en lo posible, que las olas pasen por encima. Una falda o faldón, para prevenir que el petróleo pase por debajo de la línea de flotación. Un elemento tensor longitudinal, que da la resistencia estructural a la barrera y permite fijar sus anclajes. Lastre o pesos, que en interacción con el elemento de flotación permiten la verticalidad de la barrera. Conectores, que permiten la unión de varios tramos o secciones de barreras, para así alcanzar la longitud deseada y por cubrir el área afectada.

2.8.2.2 Barreras neumáticas de aire

El equipo consiste en una línea con perforaciones por donde se dejan escapar burbujas de aire bajo el agua, éstas suben hasta la superficie y se expanden. Durante su desplazamiento generan una corriente ascendente de agua, la misma que al llegar a la superficie se transforma en corrientes superficiales que se alejan del punto de afloramiento y pueden servir para contener una mancha de petróleo.

2.8.2.3 Barreras químicas (aglutinantes)

Otro sistema de contención de petróleo es por medio de la aplicación de productos químicos llamados aglutinantes en la superficie de un cuerpo de agua. Estos productos son líquidos orgánicos con un alto peso molecular que, en comparación con el petróleo, poseen una mayor tendencia a la extensión por la superficie disponible del agua. De esta manera confinan la mancha de petróleo y previenen su extensión.

Los aglutinantes son productos no solubles en agua y deben ser aplicados sobre la superficie del derrame, con la finalidad de mover el petróleo en la dirección deseada, o contenerlo y retardar su extensión o movimiento. Las técnicas de aplicación de estos productos químicos varían, influyen la ubicación y extensión de la mancha que se desea controlar, los métodos de aplicación incluyen el uso de aplicadores manuales, desde botes o helicópteros.

2.8.2.3.1 Aplicación de aglutinantes

La aplicación de un aglutinante debe hacerse tan pronto como sea posible, después de haberse producido un derrame. Estas sustancias endurecen los hidrocarburos derramados en el mar para facilitar su control sin embargo se debe tener presente que pierden su eficiencia cuando el petróleo ya ha sufrido degradación, o ha formado emulsiones o si previamente se han utilizado dispersantes.

Estos colectores químicos de petróleo pueden ser usados para dirigir el derrame a un área más pequeña y ser controlados con mayor facilidad por medio de barreras mecánicas, o para dirigir el derrame hacia un recuperador de producto.

2.8.2.4 Barreras sorbentes

Este tipo de equipo de contención puede ser empleados para proteger la orilla costera o playas, son equipos de fácil maniobrabilidad. Existen varios tipos de barreras flotantes confeccionadas con materiales sorbentes, los cuales van dispuestos en su superficie que les permite absorber una considerable cantidad de petróleo al hacer contacto con dichas barreras; pueden ser utilizadas en el agua aunque en la práctica

común se los utiliza para proteger áreas más sensibles como costas, orillas, playas y puertos.

2.8.2.5 Barreras improvisadas

La experiencia ha demostrado que cuando se produce un derrame y no se dispone de barreras comerciales a tiempo, se puede utilizar como equipo de contención una barrera, es decir, que tenga un francobordo, un elemento de flotación y lastre. En aguas tranquilas una barrera improvisada es tan eficiente como una de tipo comercial. Se puede idear rápidamente, por ejemplo, una barrera con simples troncos (elemento de flotación), a éstos se les hace un agujero en los extremos con el uso de un taladro, este agujero debe sobrepasar el ancho del tronco (francobordo), por este agujero hacemos pasar un tubo de acero (lastre), por el cual se unirá este tronco a otros para obtener una barrera más larga.

2.8.3 Recolección del derrame

Bajo algunas circunstancias puede ser posible recuperar el hidrocarburo para un eventual procesamiento, o para su mezclado con combustible. Esta deberá ser siempre la primera opción a considerar. Para realizar la recuperación física del petróleo derramado en el agua, es necesario el uso de recolectores mecánicos.

La mayoría de recolectores funcionan bien cuando la mancha de petróleo es relativamente gruesa ya que si la capa que entra al recolector es muy delgada, el promedio de recuperación y la eficiencia de recolección, (volumen de petróleo recuperado con relación al volumen total de líquido recolectado), disminuyen notablemente. Mucho de los recolectores se utilizan conjuntamente con barreras de contención, las

cuales aumentan el espesor de la mancha desviando el petróleo hacia el recolector.

Las condiciones climáticas locales tienen una gran influencia en la eficiencia de los recolectores. El viento puede ser la causa de que la mancha sea alejada del recolector, aunque también la puede acercar. Cuando la velocidad de la corriente excede de 0.6 nudos, el petróleo puede pasar por debajo del recolector salvo que este equipo sea movido en la misma dirección de la corriente y de la mancha que avanza.

Todos los recolectores trabajan mejor en aguas tranquilas, con poca o ninguna acción de las olas ya que estas reducen la movilidad de algunos tipos de recolectores y disminuyen la eficiencia de recolección de la mayoría de ellos. El efecto de las olas varía considerablemente con cada clase de recolector; algunos operan con olas de hasta 60cm, mientras que otros fallarían con olas de 10cm.

Cuando mayor es la viscosidad del petróleo más difícil será que la mancha se dirija hacia el recolector. Petróleos con alta viscosidad cloquean la entrada de algunos recolectores y los dejan fuera de operación. De una manera similar el petróleo meteorizado, tiende a ser más difícil de recuperar que el petróleo fresco, ya que la viscosidad tiende a aumentar a medida que el petróleo permanece a la intemperie. En algunas oportunidades, ocurre que el petróleo expuesto a las inclemencias del tiempo puede ser recolectado desde la superficie del agua, pero no puede ser transvasado debido a las limitaciones de los sistemas de bombeo para manejar estos productos.

Pequeñas cantidades de desechos pueden ser removidos pasando el hidrocarburo a través de una malla metálica. Asumiendo que el hidrocarburo es adecuado para su reciclaje, es probable que los

refinadores potenciales u otros usuarios no tengan mucho espacio de almacenamiento disponible, o capacidad de procesamiento y deba requerirse de un almacenamiento intermedio alterno. Las estaciones de deslastrado de tanques y las terminales de recepción para decantación, pueden ser apropiados en este sentido pero puede también tener capacidad limitada. Esta separación, frecuentemente puede ser efectuada por gravedad, ya sea en dispositivos de recolección, tales como camiones de vacío, o en tanques a bordo de embarcaciones de recuperación mecánica, siendo removida el agua, por bombeo o extrayendo la capa inferior.

La extracción del agua desde las emulsiones agua-en-hidrocarburo (mousse) es más difícil. Éstas emulsiones generalmente inestables pueden romperse mediante tratamiento térmico a una temperatura máxima de 80 °C y dejando que el hidrocarburo y el agua se separen por gravedad.

En climas cálidos el calor del sol puede ser suficiente. Emulsiones más estables pueden requerir el uso de sustancias químicas conocidas como "rompedor de emulsión" o "demulsificadores", los cuales también tienden a reducir la viscosidad de la mayoría de los hidrocarburos haciéndolos más fáciles de bombear. Una excepción de esto es el "mousse" producido por el combustible pesado, bajo condiciones frías, aunque es más viscoso que el petróleo solo, a menudo es más fácil de bombear.

No existe sustancia química alguna en forma aislada que se adecue a todos los tipos de emulsión, y puede ser necesario llevar a cabo pruebas en el lugar para determinar el agente más efectivo y el régimen de dosaje óptimo. Sin embargo, estos regímenes de dosaje están en el rango de 0.1 - 0.5% del volumen a granel a ser tratado. Este tratamiento

se lleva mejor a cabo durante la transferencia de la emulsión, desde el dispositivo de recolección a un tanque, o desde un tanque a otro, para asegurar una buena mezcla y por consiguiente un mínimo régimen de dosaje. El rompedor de la emulsión puede ser inyectado en el lado de admisión de una bomba.

Después de la separación, la fase acuosa contendrá la mayor parte del rompedor de la emulsión, y hasta 0.1% de combustible, y de esta manera se deberá prestar atención a la eliminación de dicha agua. Experimentos recientes han indicado que se puede producir ruptura parcial de las emulsiones mezclándolas completamente con arena en equipos Standard, tales como mezcladoras de concreto. Si una emulsión conteniendo típicamente 70% de agua, es mezclada aproximadamente 50% por volumen de arena, el contenido del agua puede reducirse a la mitad. La arena limpia y el agua libre que separan, pueden ser devueltas a la playa.

En ciertas ocasiones puede ser posible recuperar el hidrocarburo desde el material contaminado de la playa. Generalmente esto involucra el lavado de dicho material con agua, algunas veces empleando solventes adecuados, tal como petróleo diesel, a fin de liberar el hidrocarburo.

El lavado con agua puede ser efectuado empleando mangas de alta presión para aflojar y desprender el hidrocarburo de los desechos contenidos en un hoyo de almacenamiento temporal. La mezcla resultante hidrocarburo/agua, puede ser entonces bombeada lejos y separada por gravedad. La separación también puede realizarse en un sistema cerrado usando agua, o un solvente. Se han desarrollado dispositivos basados en una gama de equipos, desde mezcladora de cemento Standard para operaciones secuenciales a pequeñas escala, hasta equipos de procesamiento de minerales para tratamiento continuo a gran escala.

Aunque estos sistemas han dado resultados exitosos durante las pruebas, de ellos no tienen todavía una amplia aplicación en sucesos de derrames de hidrocarburos. El costo de limpieza de grandes cantidades de material de playa contaminada, en el lugar del suceso podrá compararse favorablemente con otros métodos que involucren el tratamiento de dicho material a alguna distancia desde la costa.

Para derrames en mar abierto, el objetivo del combate es recuperar la mayor cantidad posible de petróleo derramado y desviar el que no es posible recoger, mediante barreras y recolectores costa afuera, para que no llegue a áreas sensibles. En condiciones ambientales adversas (por ejemplo, con corrientes mayores de 1 nudo). La gran mayoría de las medidas preventivas serán inútiles. El petróleo de alta viscosidad o solidificado solo es recuperable mediante rastras.

Si los derrames mayores de 500 barriles, son contenidos por barreras, se recuperan mas efectivamente, utilizando recolectores autopulsados. Sin embargo, debido a lo extenso del área bajo riesgo por el derrame y dado que no existe suficiente cantidad de recolectores de este tipo no es practico pensar sino en recolectores mas pequeños tales como Morris MI-3, junto con la barrera Vicoma serán utilizados en la mayoría de los casos.

2.8.3.1 Equipos recolectores de hidrocarburo en el mar

Un recolector de petróleo puede ser definido como un equipo mecánico diseñado para remover el petróleo desde la superficie del agua sin causar mayores alteraciones en sus propiedades físicas o químicas. En general, estos equipos pueden ser clasificados de acuerdo a sus principios básicos de operación, tal como:

- Recolectores tipo vertedero.
- Recolectores de correa o cinta oleofílica.
- Recolector tipo soga oleofílica.
- Recolector tipo disco oleofílico.
- Recolectores de unidad de succión estacionaria, cabezal de recolección estacionario y centrifugo dinámico.

Algunos recolectores pueden dejar de operar o disminuyen su eficiencia cuando encuentran materiales flotantes en el petróleo derramado. Para minimizar este problema, se han incorporado rejillas protectoras, pero es necesario realizar limpiezas periódicas al equipo a fin de mantener la eficiencia de la operación. Los recolectores se utilizan generalmente una vez que el petróleo ha sido confinado o contenido con barreras flotantes para evitar que las capas de petróleo lleguen hasta las playas y costas.

Se deben tomar en consideración la profundidad del agua y condiciones climatológicas para obtener una mayor eficiencia en recolección. Las ensenadas y los estuarios proveen buenas condiciones para la recolección del petróleo. Aunque la operación puede verse imposibilitada por la poca profundidad.

2.8.4 Deposición directa

Tal vez la vía mas común que se adopte para la eliminación, cuando resulta impracticable la recuperación del hidrocarburo, sea descargándolo en sitios designados, de relleno de tierra. Los materiales destinados para directo enterramiento deberán tener un contenido máximo de hidrocarburo, de aproximada mente 20%. Los lugares para la eliminación de desperdicios oleosos deberán estar ubicados bien alejados de los estratos agrietados o porosos a fin de evitar el riesgo de contaminación de

aguas subterráneas, particularmente si esta es extraída para uso industrial o doméstico.

La eliminación del hidrocarburo a menudo es un método aceptable, la basura oleosa deberá depositarse por debajo de 4 metros de tierra como mínimo. En los lugares donde se encuentren disponibles canteras fuera de uso, casi siempre constituyen lugares satisfactorios para la eliminación. Sin embargo esos sitios son a menudo impermeables al agua y es importante asegurarse que la cantera sea lo suficientemente profunda para evitar el rebose de cualquier cantidad de agua de lluvia acumulada, lo cual podría transferir el hidrocarburo fuera de ese lugar.

En el caso de líneas de playa ligeramente contaminadas con desperdicios oleosos o con bolas de alquitrán, puede ser posible enterrar el material recolectado en la parte posterior de dicha playa, a condición de que no exista riesgo de daños a la vegetación, o que el hidrocarburo pudiera estar al descubierto.

2.10.5 Tratamiento químico:

En todas las emergencias de derrames de petróleo, la respuesta rápida y efectiva de acción son las directrices para el éxito de las operaciones de remoción y limpieza. El tratamiento químico es generalmente utilizado cuando los métodos convencionales de contención y recolección se ven limitados por las condiciones climatológicas reinantes en la zona del derrame.

Dependiendo del lugar donde se produzca el derrame, la zonas circundantes, los recursos en peligro, etc., se deberán tomar las decisiones más convenientes que llevarán al uso de técnicas muy diversas, las cuales se pueden llevar a cabo por separado y más

frecuentemente de manera conjunta. Dentro de estas técnicas de respuesta, se encuentra el uso de dispersantes de derrame de hidrocarburos. En los últimos tiempos se ha logrado avances significativos tanto en el campo de los dispersantes como en el de sus técnicas de aplicación.

2.8.5.1 Dispersantes

Los dispersantes son mezclas que contienen agentes tensoactivos para reducir la tensión interfacial entre los hidrocarburos y el agua del mar, esto permite que una mancha de hidrocarburo se fragmente en gotas muy pequeñas (de diámetro inferior a 100 micras) las que se dispersan rápidamente por la masa de agua a consecuencia del movimiento natural de ésta.

La dispersión es un proceso mediante el cual un líquido se distribuye en el seno de otro en forma de pequeñas gotas. También, sistema heterogéneo, formado al menos por dos líquidos inmiscibles de forma que uno se encuentra íntimamente disperso en el seno de otro en forma de gotas cuyos diámetros exceden de 0,1 micrómetros en general. En los derrames de crudos de petróleo en agua se forman dispersiones, tanto de crudo en agua como de agua en crudo, aunque en este trabajo denominamos dispersión solamente al proceso de distribución de microgotas de crudo en el seno del agua y al sistema formado.

Su estabilidad es pequeña por que las microgotas de crudo tienen tendencia a la coalescencia entre ella para formar una película de crudo que se separa de la fase acuosa cuando ésta se encuentra en calma. Al proceso inverso de distribución de gotas de agua en el seno de la capa de crudo la denominamos emulsión.

2.8.5.1.1 Tipos de dispersantes

- Hidrocarburo o dispersantes convencionales, que están basados en disolventes de hidrocarburos y contienen entre el 15 y 25% surfactante. Ellos son destinados para una aplicación neta y no deben ser prediluidos con agua de mar porque ésta los vuelve inefectivos. La dosis típica esta en razón de 1:1 y 1:3 (dispersante: petróleo).
- Concentrados o con la misma mezcla de dispersantes, los que están basados en alcohol o solvente glicol y usualmente contiene una alta concentración de componentes surfactantes. Contienen más ingredientes que los dispersantes corrientes y suelen provocar una dispersión más rápida y mejor que los hidrocarburos. Ellos pueden ser aplicados puros o prediluidos con agua de mar. La dosis típica esta en razón de 1:5 y 1:30 (dispersante neto: petróleo).
- Dispersantes basados en hidrocarburos y concentrados prediluidos con agua de mar, éstos requieren un mezclado completo con el petróleo después de la aplicación para producir una dispersión satisfactoria. Sin embargo, los concentrados, si son esparcidos directamente sobre el petróleo sin diluir, no requieren el mismo grado de mezcla y usualmente el movimiento natural del mar es suficiente para romper una película tratada en gotas.

2.10.5.1.2 Mecanismo de dispersión química

El componente clave de un dispersante es un agente superficial activo (surfactante), el cual tiene una estructura molecular tal que una parte de la molécula tiene una afinidad por el aceite (oleófilo) y el otro tiene una afinidad por el agua (hidrófila). Cuando en forma equitativa es aplicado y mezclado dentro del aceite flotante, las moléculas llegan a ordenarse en interfase aceite/agua, el resultado es que la tensión interfacial entre el aceite y el agua se reduce favoreciendo la formación de

gotas de aceite finamente dispersadas en un área superficial combinada más grande que la película oleosa original.

Aparte de promover la formación de gotas, los dispersantes realizan un rol secundario de prevenir la coalescencia de las gotas de crudo una vez que estas gotas están formadas. Es importante sin embargo conocer las limitaciones de los dispersantes, aunque en general sirven para dispersar la mayoría de los petróleos crudos y las emulsiones líquidas de agua en petróleo (A/P), con viscosidades menores, no son efectivas con emulsiones espesas (mousse de chocolate) o petróleos con punto de fluidez cercanos o sobre la temperatura ambiente.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de productos químicos utilizados para el tratamiento de derrames de petróleo tanto en el agua como en tierra. El Plan de Contingencia contra la contaminación de sustancias peligrosas de los Estados Unidos contempla los siguientes productos químicos:

- Dispersantes, que solubilizan, emulsifican o dispersan el petróleo en la columna de agua.
- Agentes colectores superficiales, (aglutinantes) que forman una película superficial para controlar el esparcimiento de la mancha de petróleo.
- Aditivos biológicos, que son colonias microbiológicas, enzimas o nutrientes utilizados para estimular la biodegradación del producto derramado.
- Agentes de combustión, que incrementan la combustibilidad del petróleo.
- Otros agentes químicos, gelatinizantes.

La relación y uso del producto más adecuado dependerá de varios factores a saber, tales como:

- Tipo y cantidad de petróleo derramado.
- Condiciones climatológicas.
- Sensibilidad ambiental de las zonas de mayor riesgo a ser afectadas.
- Distancia del derrame a la zona costera y profundidad del agua.
- Disponibilidad de equipos apropiados para la aplicación de los productos.
- Costos **[8]**.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Descripción de las condiciones actuales del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el golfo de México

La plataforma petrolera Deepwater Horizon trabajaba en la perforación del pozo de petróleo ubicado en el bloque Macondo para ponerlo a producir. Deepwater Horizon era propiedad de la empresa de exploración Transocean, subcontratada por BP, de donde eran también la mayoría de los trabajadores. La parte superior del pozo está a unos 1.524 metros bajo la superficie marítima en el del Golfo de México, justo enfrente del delta del río Mississippi.



Figura 3.1 Plataforma Deepwater Horizon transportada al lugar de exploración [23].

Los pozos de explotación petrolera submarinos no son sólo los agujeros de perforación con una tubería pegada a ellos, a medida que la

perforación se realiza, un fluido, generalmente barro, sale de la broca de forma tal que empuja los escombros hacia arriba.

Este fluido también contrarresta la presión para permitir que el petróleo y el gas sigan su camino hacia la superficie. La presión dentro del pozo se encuentra en 6.700 psi (libras por pulgada cuadrada) y continúa subiendo de manera constante. Cuando todos los pasos de la perforación se completan, se pone cemento en una cubierta de metal que se coloca en el lugar del agujero. En este caso, el pozo ya se había cementado y estaba listo. En el momento que ocurrió el accidente, el pozo estaba prácticamente acabado.

El 20 de abril de 2010 se produjo una explosión y posterior incendio en la plataforma, a pesar de los esfuerzos de la guardia costera por controlar las llamas, la plataforma acabó hundiéndose 36 horas después en aguas del Golfo de México, cerca de las costas de Louisiana (Estados Unidos). En el momento de la explosión se encontraban en la plataforma 126 personas, la mayoría de las cuales pudieron ser rescatadas y trasladadas a tierra, salvo 11 que permanecen desaparecidas. El incidente ocasionó una fuga incontrolada y continua de crudo al mar, que generó un vertido contaminante de consecuencias catastróficas. [9].



Figura 3.2 Súbita explosión en la plataforma Deepwater Horizon [24].

3.1.1 Posibles causas del accidente

3.1.1.1 Fallas en los mecanismos de seguridad

Los técnicos hablan de un reventón (blowout), término que se refiere a la liberación explosiva que tiene lugar cuando el petróleo y el gas a alta presión que están en el pozo submarino exceden la presión del sistema electromecánico diseñado para controlarla. Al momento del reventón inesperado la presión del pozo ascendió hasta casi las 7000 psi, la máxima capacidad del preventor de reventones de la plataforma era de 6200 psi de retención, ésta válvula no soportó la gran arremetida del flujo de crudo y gas.

El preventor de reventones (BOP o blowout preventer), dispositivo que descansa sobre el lecho del océano, tenía la capacidad de cerrar cualquier pozo que pierda petróleo de múltiples maneras tales como: acoplado una tubería o simplemente comprimiendo el tubo del pozo que perdía petróleo (tal como se aprieta un pitillo plástico), hasta que éste se

corta. Normalmente, un equipo hidráulico operado por ingenieros desde la superficie de la plataforma permite cerrar el preventor de reventones. Como medida extra de seguridad, muchos BOP poseen válvulas que lo cierran automáticamente cuando se produce una interrupción de comunicación con la plataforma en la superficie. Los BOP de otras plataformas poseen además un dispositivo adicional de seguridad que es un interruptor radio-controlado que le permite a la tripulación en la plataforma cerrar la válvula de manera remota. La plataforma Deepwater Horizon no poseía esta medida de seguridad extra.

3.1.1.2 Colocación del cemento

Para el proceso de cementación un taladro baja desde la plataforma, penetra en el fondo marino creando un pozo sobre el que va bajando una tubería de revestimiento, la tubería se coloca en el pozo, lo que permite bombear el cemento en la tubería para que quede fija. Una vez que el cemento se ha colocado y está estable, comienza otra fase de la perforación.

Información importante sobre la cementación están siendo investigadas por Transocean, esto incluye el tipo de cemento usado, el volumen y el tiempo que se requería para que se solidificara. El congresista estadounidense Henry Waxman, que lidera las investigaciones sobre el desastre, señaló que hubo "una falla para sacar lodo con bolsas de gas fuera del pozo". Esto debería haberse hecho antes de la cementación.

3.1.1.3 Centralizadores

Estos dispositivos aseguran que la tubería o la carcasa estén centralizadas durante el proceso de cementación para garantizar un buen

trabajo. Halliburton (empresa contratista para el trabajo de cementación) recomendó que se utilizaran 21 centralizadores, pero BP decidió usar sólo seis.

3.1.1.4 Sistema de revestimiento

Debido a la importancia de conseguir un buen trabajo de cementación en el pozo, proceso que permite adherir las capas de revestimiento y la formación geológica en la que se excava el pozo, generalmente se realizan una serie de mediciones llamadas "sistema de revestimiento". Un dispositivo de exploración sonora se baja a través del pozo en un cable para comprobar si hay imperfecciones en el revestimiento u otros problemas con el cemento. Si los hay, se puede colocar más cemento en las secciones afectadas. Otros documentos sugieren que el ahorro de costos al no tener el sistema de revestimiento es de aproximadamente US \$ 118.000. Al parecer BP no utilizó adecuadamente éste sistema.

Según Waxman, BP optó por una sola línea de revestimiento desde el fondo del mar hasta el final del pozo. La opción más cara hubiera sido usar una funda, es decir una línea externa y dentro de ésta, otra tubería. Este sistema habría creado más barreras al flujo ascendente del petróleo y el gas, pero también habría sido más caro.

3.1.1.5 Sistema de válvulas de seguridad

Cualquiera que sea la causa exacta del accidente, está claro que hubo una especie de golpe de gas y una explosión que derivó en un aumento incontrolado de la subida del petróleo y el flujo de gas a la superficie. Se supone que la válvula de seguridad debe evitar que esto ocurra.

Concretamente, la serie de válvulas de seguridad de esta plataforma que fue construida por la empresa estadounidense Cameron a petición de Transocean, tenía cinco tipos de válvulas de seguridad cilíndricas y dos válvulas de seguridad anulares, según explicó un ejecutivo de Transocean. Estos dispositivos no impidieron la explosión, tampoco fue posible activarlos mediante un sistema de control remoto.

Hasta el momento, se ha hablado principalmente de dos posibles escenarios. Uno, sugerido por Transocean, es que la explosión fue tan catastrófica que empujó fragmentos de cemento a través de la válvula de seguridad tan velozmente que esta se dañó y no se pudo activar, un indicativo de la fuerza de lo que sucedió es que los fragmentos de cemento llegaron a la cubierta de la plataforma petrolera. La otra posibilidad es que las válvulas de seguridad fallaron desde un primer momento, hubo denuncias iniciales de que las baterías del panel de control de las válvulas de seguridad estaban descargadas, algo que ha sido negado por Transocean.

La última línea de defensa en una válvula de seguridad suele ser una lámina ciega para cortar la tubería. Este dispositivo, que se activa hidráulicamente, utiliza hojas impulsadas por pistones para cortar la tubería, lo que interrumpe el flujo. Esto tampoco funcionó. Una posible explicación es que la sección de la tubería que estaba tratando de cortar era una sección de "herramienta de articulación" estas uniones entre las tuberías suelen ser tan fuertes que una lámina de corte ciego no puede cumplir su función en ellas. Otra posibilidad es que no funcionase algo en la lámina ciega para cortar la tubería.

Con el fallo en el sistema de prevención de explosiones, la plataforma estaba en peligro. Todo sucedió muy rápido, está claro que el equipo que trabajaba en la plataforma tuvo muy poco o nada de tiempo

para reaccionar. El tiempo entre los primeros indicios de problemas y las explosiones fue casi instantáneo.

A todas éstas, el 20 de abril de 2010 será recordado como una de las fechas más negras en la historia de la lucha para mejorar las condiciones medioambientales del planeta, así como de aquellas que hoy por hoy se libran, en distintos frentes y latitudes globales, para contrarrestar los impactos negativos del cambio climático antropogénico. El accidente de la British Petroleum ocurrido cuando una explosión destruyó la plataforma Deepwater Horizon manejada por la Compañía Transocean que operaba para BP, representa la mayor catástrofe petrolera y ambiental en el Golfo de México.

La plataforma estaba haciendo exploraciones submarinas enmarcadas dentro del proyecto Macondo de la compañía BP (petrolera británica), 68 kilómetros al sureste de Venice, Luisiana, EEUU específicamente a 1.525 metros bajo el agua. **[10]**.

3.1.2 Cronología de los hechos después del accidente

3.1.2.1 Semana del 22 al 30 de abril

- Luego de la fuerte explosión una mancha fue detectada a unos 70 kilómetros de la costa de Luisiana, pero la empresa operadora British Petroleum (BP) dice que puede tratarse de combustible diesel de uno de los tanques de la plataforma que tenía una capacidad para 2,6 millones de litros. La mancha detectada por la tripulación de la guardia costera estaba entre 1.5 km² y 8 km² lo que parecía ser crudo derramado en el mar, de ser así las autoridades temen que el daño ambiental llegue a las costas de Louisiana.

- Se creó un incendio controlado del crudo que se acumula en la superficie, a partir de la utilización de barreras especiales de confinamiento. El objetivo es evitar que el petróleo alcance los pantanos del estado de Louisiana.
- Robots submarinos están siendo utilizados en un esfuerzo desesperado para taponar la fuente de un derrame de petróleo en el Golfo de México que podría provocar un gran daño ambiental. Debido a que los robots submarinos no lograron activar una válvula para frenar la fuga en el lecho marino, BP espera ahora cubrir el pozo con un gigantesco embudo invertido que capturará el crudo y lo canalizará a través de una embarcación en la superficie. Pero ese esquema demoraría cuatro semanas en ser instalado. Para ese momento podrían haberse vertido más de 150.000 barriles.



Figura 3.3 Hundimiento de la plataforma Deepwater Horizon [25].

3.1.2.2 Semanas del 1 al 29 de mayo

- La empresa BP quema unos 30 millones de pies cúbicos de gas diarios en la boca de la fuga, lo que suma unos 450 millones de pies cúbicos desde que comenzaron las tareas de recuperación. (Dicho por vocero de la empresa).

- Un embudo gigante ha sido posicionado por técnicos de la empresa *British Petroleum* encima del pozo petrolero averiado en el fondo del Golfo de México, en un intento por contener el derrame de petróleo ocasionado por la plataforma petrolera *Deepwater Horizon*. Sumergibles a control remoto guiaron el domo de de acero de 98 toneladas de peso, hasta unos 1500 metros de profundidad, en caso de tener éxito este embudo recogerá un 85 % del petróleo vertido en el lecho marino, que a través de barcos será llevado a tierra firme.
- BP debió retirar el embudo gigante, luego de que éste empezara a acumular estructuras cristalinas en su interior, que surgen cuando entra en contacto agua y gas a bajas temperaturas y a alta presión.
- BP empieza el procedimiento "top kill", proceso mediante el cual se que inyecta fluidos pesados y otros materiales al pozo dañado para frenar la fuga y después sellarla con cemento. El presidente de los Estados Unidos Barack Obama recuerda que no hay plenas garantías del éxito de la operación, e insiste en que el derrame pone en relieve la necesidad de encontrar fuentes alternativas de energía.
- BP anuncia que el procedimiento "top kill" falló. La empresa dice que colocará una cúpula para tapar el pozo y usará robots a control remoto para bombear el crudo hacia un buque en la superficie en lugar de cerrar el pozo.



Figura 3.4 Hundimiento de la plataforma Deepwater Horizon [25].



Figura 3.5 Aparición de la mancha de crudo posterior al hundimiento de la plataforma Deepwater Horizon [25].

3.1.2.3 Semanas del 1 al 30 de Junio

- BP comenzó los preparativos para un nuevo intento que frene por fin el derrame masivo de petróleo en el Golfo de México. La empresa británica planea bajar un dispositivo de contención sobre el pozo con la esperanza de que la mayor parte del crudo pueda ser conducido a la superficie. El intento consiste en el que robots submarinos harán un corte en un tubo y colocarán el dispositivo conocido como Caja Baja de Elevación (Lower Marine Riser Package), que debe ser descendido hasta la base del pozo petrolero dañado y una nueva tubería llevará el petróleo capturado hasta un buque en la superficie.
- La Petrolera Británica (British Petroleum) logra cortar con éxito la tubería subterránea por la que fluye el vertido de petróleo en el golfo de México y ahora intentará colocar una caja contenedora para recolectar el crudo.

- La compañía BP comenzó a utilizar productos químicos debajo de la superficie del mar, para dispersar el petróleo. Se afirmó que el procedimiento parece estar funcionando pues se ha reducido el volumen de crudo en la superficie. Los compuestos químicos utilizados son menos tóxicos, diluyen el petróleo en pequeñas gotas, lo que facilita su absorción por micro-organismos marinos.
- La nueva campana sobre el pozo de petróleo averiado en el Golfo de México ha conseguido por los momentos poner fin al derrame del crudo en el mar, pero los ingenieros deben llevar a cabo una serie de pruebas. Estas pruebas consisten en cerciorarse de que al cerrar el pozo el petróleo no va a empezar a filtrarse por otro lado y crear un problema peor al que ya existe. Si el resultado de las pruebas recomendaría no cerrar el pozo, se usaría la campana como un sistema de contención a través del cual se traspasaría el crudo a buques de carga en la superficie marina.

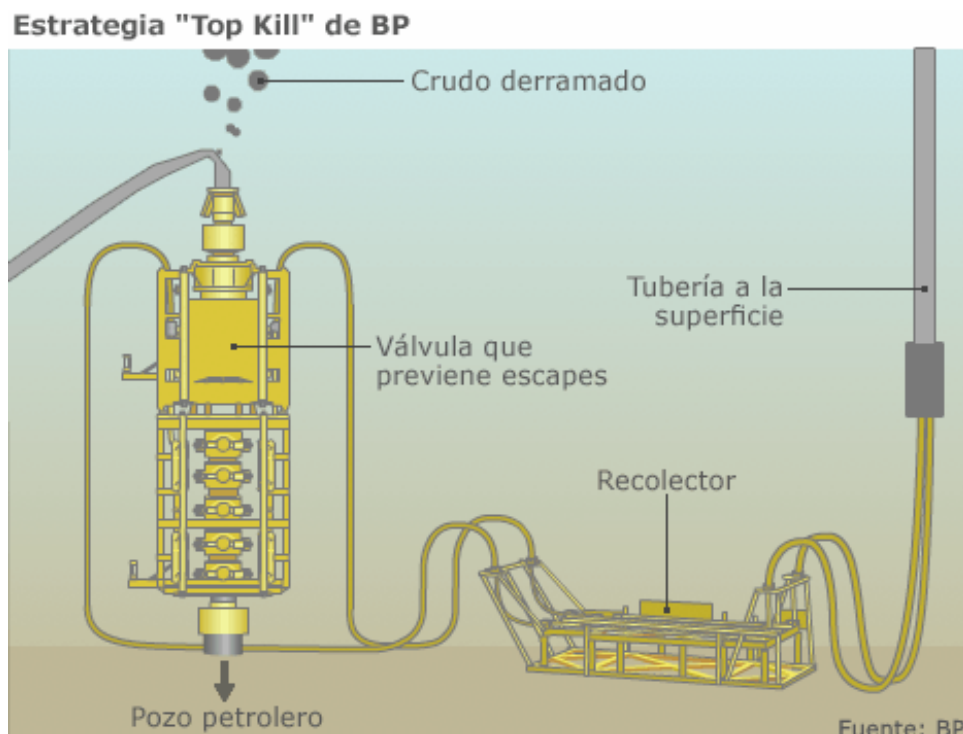


Figura 3.6 Estrategia de Eliminación desde el Tope (Top Kill) realizada por la empresa Petrolera Británica BP [26].

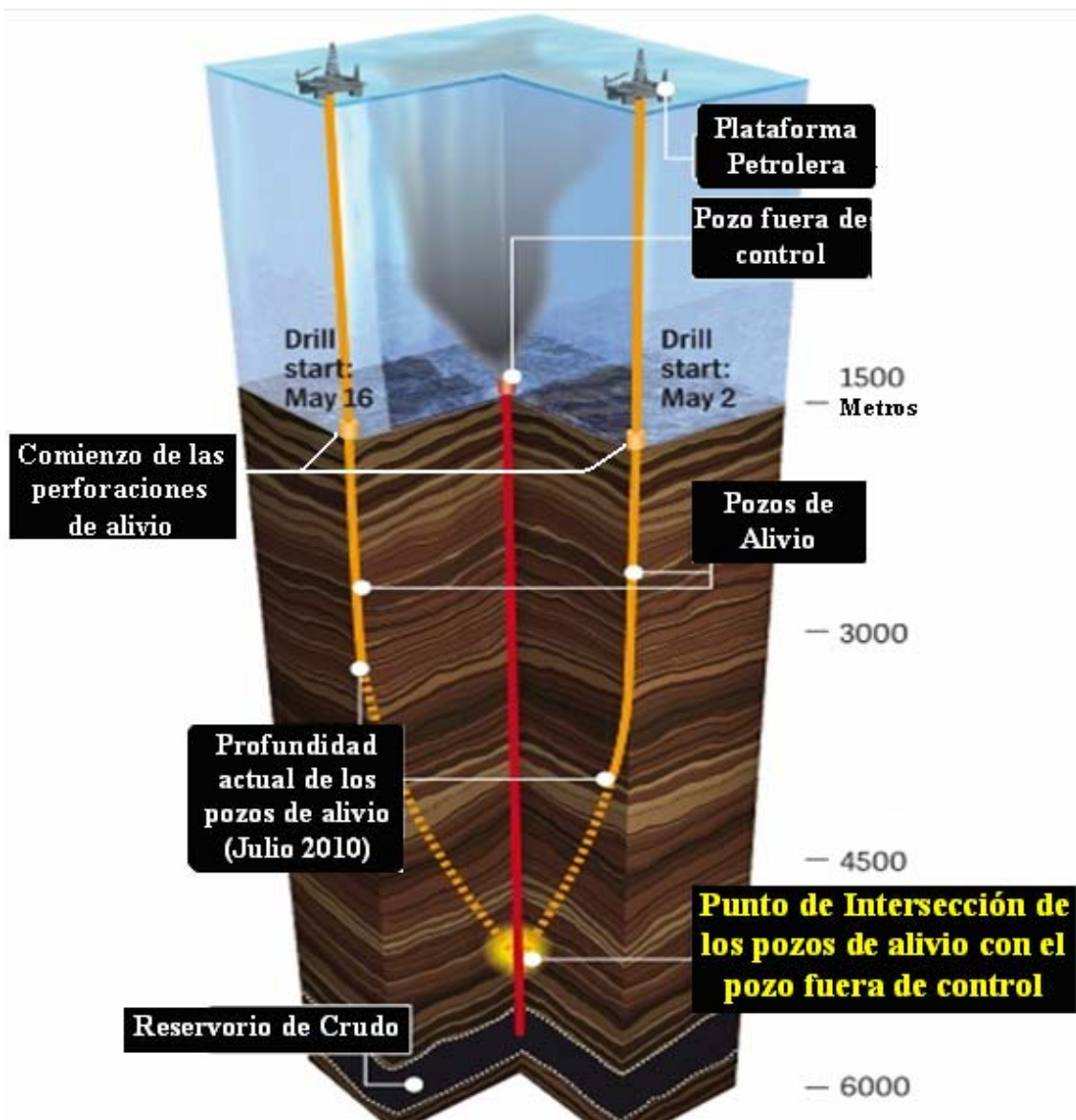


Figura 3.7 Estrategia de Eliminación desde el Fondo (Bottom Kill) realizada por la empresa Petrolera Británica BP [27].

3.1.2.4 Semanas del 1 al 30 de Julio

- La Petrolera Británica (BP) inicia la primera fase del nuevo intento para sellar, mediante el método "static kill", el pozo averiado. Ya se había probado en mayo, sin éxito, inyectar una mezcla de cemento y lodo pesado. La diferencia con este nuevo intento similar es que ahora BP cuenta con una campana de contención sobre el pozo

que por el momento lo mantiene cerrado y que permitiría a los equipos inyectar la mezcla a baja presión y a baja velocidad con mayores probabilidades de éxito en la superficie.

- Una vez concluido la “eliminación estática” (static kill), BP procederá a otra operación conocida como “eliminación desde el fondo” (bottom kill). Esta operación se llevara a cabo a través del pozo de alivio que BP excava y que ya ha alcanzado una buena profundidad, a través de ese pozo se introducirá otra inyección de cemento y lodo pesado al fondo que sellaría definitivamente Macondo.



Figura 3.8 Llegada e instalación de las plataformas encargadas de perforar los pozos de alivio y recuperar crudo [28].

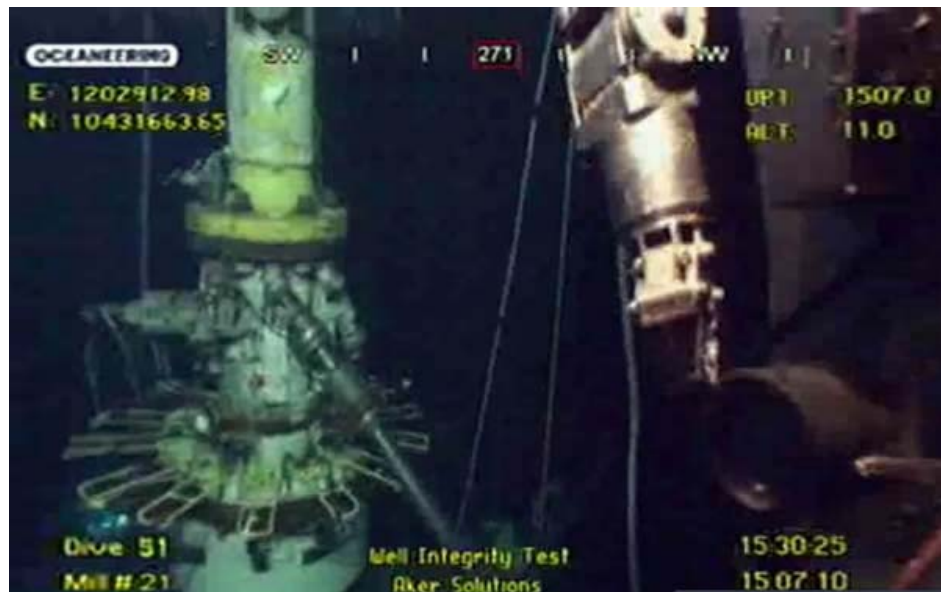


Figura 3.9 Estrategia de Eliminación Estática (Static Kill) realizada por la empresa Petrolera Británica BP [29].

3.1.2.5 Semanas del 1 al 30 de Agosto

- BP anuncio sobre el éxito de su operación de "eliminación estática". Para este procedimiento, un tipo de lodo especial fue bombeado desde la parte superior del pozo para hacer retroceder el petróleo hasta su depósito original, bajo el lecho marino.
- El pozo está siendo monitoreado y podría ser necesario recurrir a un mayor bombeo de lodo, agregó BP. Luego de esta operación, el pozo será rellenado con cemento para bloquearlo de forma definitiva.
- Un estudio sobre los efectos del derrame de crudo en el Golfo de México provocado por la explosión de la plataforma petrolera *Deepwater Horizon* confirmó la presencia de residuos químicos tóxicos a un kilómetro bajo la superficie del mar. No obstante, muestra también que esta cantidad es relativamente pequeña, posiblemente menos del 0,1% del total de petróleo derramado. [11].

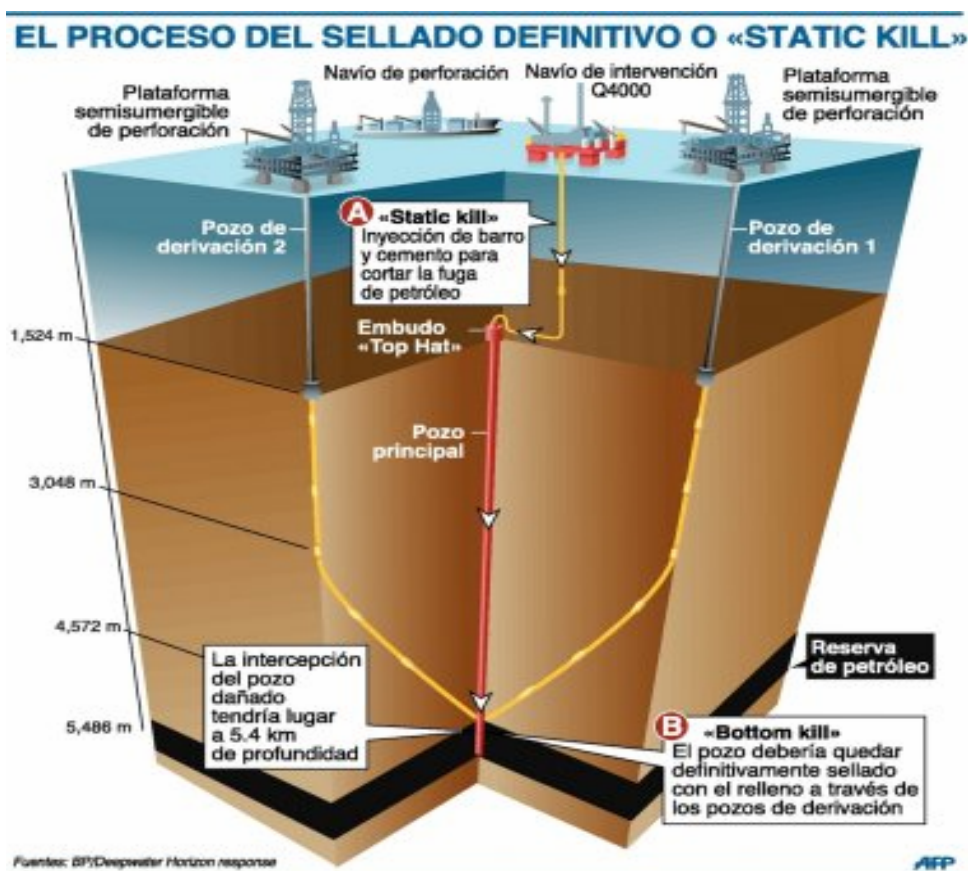


Figura 3.10 Estrategias: A - Eliminación Estática (Static Kill) y B – Eliminación desde el fondo (Bottom kill). [30].

3.2 Elaboración de propuestas para la minimización del derrame de crudo en función de las etapas fundamentales de control

A través de una investigación documental se recopiló información de periódicos, revistas, noticias de televisión, boletines informativos, tesis, manuales físicos y digitales, hojas de seguridad, libros y páginas de Internet sobre los diferentes tipos de accidentes que han derivado en derrames de crudo hacia el medio ambiente a lo largo de la historia de la industria de explotación y transporte del petróleo en los últimos 50 años.

Con la información obtenida se pudo conocer los detalles que tuvieron fuerte repercusión antes, durante y después de cada uno de los

derrames petroleros, detalles tales como las fechas, operaciones, causas de accidentes, naturaleza y gravedad del siniestro, crudo derramado y las estrategias exitosas empleadas para frenar, reducir, eliminar y remediar el fuerte impacto ecológico que ha sufrido el planeta por negligencia humana.

Las investigaciones revelan que para cada desastre, independientemente la gravedad y/o ubicación del mismo, siempre se ha intentado combatir la contaminación con una gran variedad de métodos que se han clasificado de acuerdo a un rol específico para el control de los derrames, se han empleado muchos métodos para eliminar la fuente de contaminación, métodos para evitar que la mancha de crudo se expanda, métodos para recuperar la máxima cantidad posible de petróleo derramado así como los distintos tratamientos químicos que se han probado en cada catástrofe petrolera.

A continuación se presentan las propuestas consideradas por medio de tablas que enmarcan cada etapa fundamental de control.

Tabla. 3.1 Propuestas de eliminación de la fuente de contaminación y lugares recomendados de aplicación

Métodos propuestos de eliminación de la fuente	Se Aplica
Apuntalamientos	Pozos terrestres y Marítimos de poca profundidad
Cerrar Múltiples de Producción	Generalmente Pozos Terrestres
Desviar Producción	Pozos Terrestres, Marítimos de poca y gran profundidad.
Grapas de Seguridad	Pozos Terrestres, Marítimos de poca y gran profundidad.
Taponamiento con Campana	Pozos Marítimos de gran Profundidad
Cementación de Pozo	Pozos Terrestres, Marítimos de poca y gran profundidad.
Trasiego de Tanqueros	Derrames provenientes de buques de transporte y almacenaje de crudo

Tabla. 3.2 Propuestas para contención de crudo derramado y lugares recomendados de aplicación

Método propuesto para la contención de crudo	Se Aplica
Barreras Mecánicas	Aguas tranquilas; Aguas de poca, mediana y gran profundidad.
Instalaciones Permanentes	Aguas de poca y moderada profundidad
Barreras Neumáticas	Aguas tranquilas Muelles, Bahías, Aguas Tranquilas.
Barreras Sorbentes	Muelles, Litorales, Costas, playas Riberas, manglares.
Barreras Improvisadas	Aguas tranquilas, y aguas de moderada y poca profundidad

Tabla. 3.3 Equipos propuestos para la recolección de crudo y lugares recomendados para su utilización

Equipos	Se aplica
Recolector de Discos Oleofílicos	Mar Abierto, gran capacidad recolectora, alta eficiencia, costosos, resistente a corrosión.
Recolector de cuerdas y correas Oleofílicas	Bahías, lagos, aguas de profundidad moderada y aguas profundas de mar abierto, buena capacidad, buena eficiencia, selectivos, costosos.
Recolector de tambor Oleofílico	Bahías, Lagos, mares, aguas de moderadas y gran profundidad, mediana capacidad recolectora, resistente a corrosión.
Recolector de Vertedero	Aguas muy tranquilas, alta remoción en superficies grandes, mediano y bajo costos, moderada eficiencia
Recolector de Bomba	Aguas profundas, mar abierto, alta capacidad de recolección, puede trabajar con crudos muy viscosos.

Tabla. 3.4 Propuestas de tratamiento químico y condiciones de aplicación

Tratamiento con	condiciones
Dispersantes	Aguas de mediana y gran profundidad.
Aglutinantes	Tierra Firme, Aguas de mediana y gran profundidad.
Aditivos Biológicos	Costas, Aguas de mediana y gran profundidad.
Agentes de Combustión y combustión "in situ"	Mar Abierto de mediana y gran profundidad alejado de las costas.
Gelatinizantes	Aguas de mediana y gran profundidad.

3.3 Diferencia en la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo

3.3.1 De las propuestas de eliminación de la fuente

3.3.1.1 Apuntalamiento de pozos

Cuando ocurre un derrame de crudo el primer paso suele ser cerrar todas las válvulas de seguridad siempre y cuando el accidente de tiempo a ello, pero cuando el derrame es brusco durante las primeras horas del siniestro, una de las acciones más efectivas es realizar un apuntalamiento al pozo, éste método constituye una solución temporal que permite asegurar la integridad de las paredes de un pozo derramado, introduciendo tubos de metal en el interior del pozo que a su vez pueden servir de tapón de los fluidos emergentes. Esto no elimina la fuente de forma definitiva pero permite mitigar la fuga de crudo reduciendo los contaminantes que van al ambiente exterior, de este modo se gana más tiempo para la preparación y actuación de las siguientes estrategias que permitan acabar con el problema.

A pesar de ser una solución práctica y rápida no cualquier pozo puede ser apuntalado, todo depende de la naturaleza del pozo, de su ubicación y de las condiciones del accidente. La maniobra de apuntalamiento es muy eficaz en pozos terrestres donde se puede llevar un mejor monitoreo, una rápida respuesta después del derrame y control de las filtraciones durante el apuntalamiento, éste método no es recomendable en aguas muy profundas, ya que no se llevaría a cabo con el control necesario, ni en derrames donde exista una presión muy alta debido a alto riesgo de explosión.

3.3.1.2 Cerrar múltiples de producción

En todo derrame petrolero de cualquier naturaleza la acción que siempre se debe llevar a cabo es cerrar todas las válvulas de las tuberías de almacenaje y/o distribución, los múltiples de producción se utilizan para recolectar la producción de varios pozos a una planta centralizada donde los pozos pueden ser colocados individualmente en producción y/o prueba, es de vital importancia cerrar las tuberías del múltiple de producción para evitar una catástrofe mayor de manera que el pozo accidentado no afecte la producción o integridad de otros pozos y demás equipos así asegurar la producción total del yacimiento que va a los separadores.

Cerrar múltiples de producción es un método que siempre debe aplicarse mientras éstos existan en las cercanías o red de donde forme parte el pozo derramado, por lo general los yacimientos con varios pozos y múltiple de producción se hallan en tierra firme, en la exploración y explotación de pozos petroleros en el mar pocas veces se cuenta con un múltiple de producción y menos cuando es en ultramar.



Figura 3.11 Múltiple de producción y prueba [31]

3.3.1.3 Desviar la producción o derrame

Después de ocurrido el siniestro se puede reducir bastante (o incluso eliminar) el flujo de crudo que se derrama a través del pozo fuera de control, mediante una desviación controlada del flujo hacia un lugar seguro de almacenaje. El proceso consiste en perforar horizontal o direccionalmente, dependiendo de la geología local, un pozo a cierta distancia del pozo accidentado para aliviar la tasa de derrame (pozo de alivio), los pozos de alivio tienen como finalidad producir el crudo que aún queda en el yacimiento, crudo que se hubiera derramado inevitablemente por el pozo accidentado, aunque casi siempre ésta estrategia con pozos de alivio se emplea para inyectar cemento desde el fondo del pozo de alivio hasta el fondo del pozo averiado para contribuir al sellado definitivo desde lo profundo del pozo fuera de control (Bottom Kill).

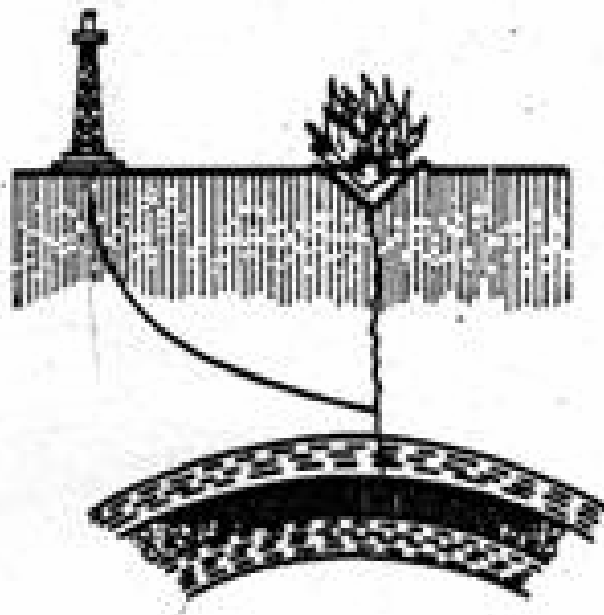


Figura 3.12 Pozo de alivio de perforación direccional [32]

Perforar y poner a producir un pozo de alivio lleva un tiempo, costo y condiciones considerables, por lo tanto éste método, aunque sea muy eficaz, no es aconsejable para todo caso, puede aplicarse en tierra firme y

en aguas de mediana y gran profundidad, generalmente éstas acciones son viables para derrames muy grandes y muy inestables donde existe alta presión; éste método suele estar acompañado de las anteriores maniobras de control ya explicadas para su éxito total.

3.3.1.4 Grapas de seguridad

Cuando el derrame proviene de una tubería rota de fácil acceso, una opción es adaptar una grapa especial de seguridad mediante llave de tuercas u otro tipo de enganche a una sección de la tubería anterior a la rotura para cerrar abruptamente el derrame, se usan distintos tipos de grapas dependiendo si el derrame es terrestre o acuático. Las grapas de seguridad representan una solución temporal al igual que el apuntalamiento, se colocan grapas a las tuberías dañadas para reducir de modo parcial o absoluto los contaminantes que van al ambiente mientras se procede con las demás estrategias, reparaciones, planificaciones y acciones necesarias para solucionar definitivamente el problema de derrame.

Puede resultar muy eficaz grapar una tubería averiada ya sea en tierra o en el fondo del mar, sin embargo la mayoría de los grandes derrames provienen de buques o del tope del pozo directamente, o en otros casos la fuga de crudo está en aguas muy profundas o en regiones de difícil acceso por lo que actuar con grapas puede no ser una solución factible, aunque si se puede aplicar para sellar tuberías dañadas por la explosión de una fuga principal cercana o para asegurar tuberías de tanques de almacenaje o recipientes que presenten filtraciones de crudo al ecosistema.

3.3.1.5 Taponamiento con campana

Proceso exclusivo para derrames de pozos en el fondo del mar; aquí se utiliza una especie de embudo invertido o campana muy pesada construida con un sistema de medidores especiales, tuberías, mangueras y válvulas para dirigir el derrame de crudo hacia la superficie del mar donde están los buques almacenadores.

Se hace descender controladamente una campana especial desde la superficie del mar hasta el tope del pozo donde fluye el crudo fuera de control ubicándose justo encima del derrame y anclándose en el lecho marino por gravedad y cementación. De ésta forma se logra controlar y dirigir eficazmente a través de una o varias mangueras conectadas a la campana hasta los tanques de los buques en la superficie.

Las principales desventajas de éste método es lo costoso que resulta fabricar, trasladar y ubicar la campana ya que se utiliza para ciertos derrames en particular, no siempre se cuenta con una campana de éste tipo por lo que hay que fabricarlas a contrarreloj después del accidente, las condiciones climáticas del lugar del siniestro afectan bastante el descenso controlado de la campana hacia el pozo, por lo que las operaciones deben realizarse en condiciones de poco oleaje y corriente así como durante un clima calmado sin fuertes vientos o lluvia.

A pesar de sus desventajas, el taponamiento con campana en el fondo del mar de un pozo accidentado es necesario si el derrame se encuentra a gran profundidad, otras operaciones no son eficaces o eficientes en éstas zonas de alta presión, baja temperaturas y poca iluminación. El método permite recobrar un alto porcentaje de crudo minimizando el impacto ambiental mientras se procede a al siguiente sellamiento definitivo del pozo con cemento.



Figura 3.13 Campana blanca de 98 toneladas de hierro y hormigón utilizada por BP para taponar el pozo fuera de control y recuperar hidrocarburos [33].



Figura 3.14 Operación de inmersión de la campana de taponamiento [33].

3.3.1.6 Cementación del pozo

Cementar un pozo se hace con diversos propósitos, como fijar los tubos de revestimiento o fundas a las paredes del pozo, anclar la campana de recuperación de crudo, etc; pero desde el punto de vista de controlar un derrame de crudo se refiere a sellar el pozo colocando una columna de cemento en el hoyo abierto o revestido, se agrega cemento directamente en la parte superior del pozo como también en el fondo del pozo a través de un pozo de alivio; cabe destacar que antes de cementar un pozo se debe reducir o controlar lo más que se pueda la cantidad de fluidos que se derrama mediante los métodos apropiados para ello, de lo contrario la presión de los flujos emergentes (lodos, crudos etc) pueden afectar seriamente la cementación, sin embargo se puede atacar el pozo directamente aplicando métodos sellamiento desde el tope simultáneamente con sellamiento desde el fondo en el pozo fuera de control.

El tiempo de fraguado después de la colocación de un tapón de cemento varía de 8 a 72 horas, según el uso de aceleradores o el tipo de pozo y de cemento, éste proceso es el que logra sellar un pozo definitivamente sin embargo se ha demostrado que en determinadas situaciones, como fluctuaciones muy bruscas de temperatura o de presión, atentan contra la integridad de la adherencia del cemento.

La planificación de la cementación y el empleo del tipo de cemento adecuado debe tener en cuenta información de referencia geológica y de producción de pozos vecinos (si los hay), geometría del hoyo (forma, diámetro), si la operación se llevará a cabo en tierra o en el mar, si es necesario inyectarle lodo u otros desechos al pozo antes de cementarlo y la historia geológica del propio pozo (por ejemplo, si existieron problemas durante la perforación y tipo de conflictos), etc.

Antes de empezar con las pruebas finales de presión, supervisión y seguimiento, así como la ejecución de los otros métodos fundamentales de control de derrames de crudo, la cementación de un pozo es el paso final para eliminar la fuente del derrame de crudo, éste proceso siempre se aplica en derrames provenientes de pozos averiados ya sean en tierra firme o en aguas de mediana o gran profundidad.

3.3.1.7 Trasiego de tanqueros

Básicamente consiste en vaciar los tanques de almacenaje de crudo de un buque petrolero que presente fugas, haciendo pasar el flujo de hidrocarburos a través de mangueras hasta otro buque cercano. El trasegado se aplica en derrames de petróleo desde los buques accidentados, es eficiente si se hace con la suficiente rapidez para recuperar el crudo del tanque averiado antes de que se derrame por completo en el mar; muchas veces éste tipo de accidente ocurre muy rápido y los buques vacíos para el trasegado se hallan a larga distancia del derrame.

La opción de trasiego no solo se aplica para el crudo en derrame, sino también para vaciar otros tanques de petróleo del mismo barco que no hayan sido afectados por el accidente y para vaciar tanques de combustible del buque petrolero y así evitar un peor accidente en caso de incendio o explosión. Obviamente estas acciones son exclusivas para accidentes de barcos que trasladan o almacenan petróleo y más eficientes cuando el derrame procede lentamente.



Figura 3.15 Trasiego de tanquero accidentado [34].

3.3.2 De las propuestas de contención de crudo derramado

3.3.2.1 Barreras mecánicas

Representan uno de los métodos de contención más importantes que se puedan utilizar a la hora de un derrame de hidrocarburos en el mar, pueden ser rígidas, semirígidas, de plástico, de lona inflable etc., es un método práctico, de fácil manejo y traslado, rápida aplicación y de un gran número de modelos, accesorios y tipos que se adaptan a cualquier magnitud de un derrame petrolero, es por esto que su utilización resulta prácticamente necesaria y obligatoria, no solo para contener crudo, sino también para ayudar a los demás métodos fundamentales de control en la erradicación de la contaminación marina.

Éstas barreras pueden describirse como "Cercas flotantes" son equipos mecánicos o físicos que se extiende sobre y por debajo de la superficie del agua, con la finalidad de contener, confinar y evitar el desplazamiento y extensión de la mancha del hidrocarburo derramado

como también se las utiliza para concentrar el petróleo derramado para su recolección, a fin de llevarlo a determinadas zonas o proteger áreas sensibles del impacto del petróleo.



Figura 3.16 Barrera mecánica tipo valla [35].

Las barreras mecánicas se clasifican en tipo cortina y tipo valla, cuyas diferencias radican en el diseño, tamaño, forma, material de construcción y uso específico. Las barreras mecánicas tipo valla poseen una sección transversal más plana manteniéndose verticalmente en el agua por flotación integral o externa. En estas barreras se utiliza más la flotación sólida, en caso de utilizar flotadores externos estos pueden generar turbulencias que ocasionen escapes de hidrocarburos en corrientes de mediana velocidad. Además son voluminosos para almacenar y difíciles de limpiar. Por lo general las barreras de valla son más adecuadas para ser utilizadas en aguas tranquilas con bajas velocidades de corrientes, como golfos, dársenas con poca amplitud de mareas entre otros.

Las barreras mecánicas tipo cortina tienen un faldón o malla flexible sub-superficial continua que se sostiene por una cámara de flotación sólida o de aire, generalmente de sección transversal circular. Las barreras de flotación por aire ocupan poco espacio de almacenamiento ya que se desinflan, mientras que las de flotación sólida, que son más resistentes a los daños, ocupan un gran espacio de almacenamiento. Las barreras de cortina poseen una buena capacidad de adaptarse a las olas, velocidades de escape moderadas y son relativamente fáciles de limpiar.



Figura 3.17 Barreras mecánicas tipo cortina [36].

Algunas de estas barreras son infladas con aire antes de su despliegue y vaciadas cuando son recogidas. Son medios de contención formados por pantallas o cortinas confeccionadas con fibras retorcidas y luego tejidas en forma de malla entrecruzada, que le confieren una mayor resistencia a los refuerzos longitudinales y transversales con un peso relativamente inferior en comparación con otras barreras.

3.3.2.1.1 Elementos de una barrera

Medio de flotación, incluye un francobordo (vela), para contener el petróleo y evitar, en lo posible, que las olas pasen por encima.

Una falda o faldón, para prevenir que el petróleo pase por debajo de la línea de flotación.

Un elemento tensor longitudinal, que da la resistencia estructural a la barrera y permite fijar sus anclajes.

Lastre o pesos, que en interacción con el elemento de flotación permiten la verticalidad de la barrera.

Conectores, que permiten la unión de varios tramos o secciones de barreras, para así alcanzar la longitud deseada y por cubrir el área afectada.

Todos tienen cierta altura por encima del nivel de flotación al igual que cierta longitud de falda por debajo del agua, para asegurar que el petróleo o residuos no escapen por arriba o debajo de las barreras de contención, las longitudes por encima y por debajo de la unidad simple de flotación dependerá del uso que tendrá ésa barrera, si es para aguas tranquilas, aguas profundas, etc., pueden desplegarse a largo de los puertos, muelles y mar abierto como servicios de limpieza para controlar cualquier tipo de derrame en el agua. Por lo general son de colores muy vistosos que hagan buen contraste con el medio circundante del derrame, los más usados son los de color naranja y amarillo.



Figura 3.18 Barrera mecánica desinflada y recogida [37].

Algunas barreras mecánicas se hacen para ser utilizadas en aguas tranquilas y protegidas, otras para aguas poco profundas, por la costa y la protección costera, para las vías navegables donde las corrientes rápidas pueden existir y para aguas profundas.

Por lo general están hechas de una lona inflable a presión o autoinflables y de PVC de alta resistencia a los rayos UV; las cadenas o cables están hechos y adaptados para soportar altas tensiones, se conectan con conectores de aluminio y vienen en 25 pies, 50 pies o 100 pies de largo; son transportadas desinfladas y empaquetadas en barcos hacia la zona del accidente siendo desplegadas e infladas en el perímetro del derrame y se extienden de tal forma que permitan rodear la mancha, cercarla y concentrarla para poderla mover a una zona de menos riesgo y así recuperar o eliminar el crudo contenido.

3.3.2.2 Instalaciones permanentes

Recordemos que la contención del petróleo, en el más amplio sentido, puede efectuarse con tres propósitos principales:

- Para mantener el petróleo en un lugar determinado.
- Para mantener el petróleo alejado de un área determinada.
- Para dirigir el petróleo hacia un punto específico.

Cuando el derrame de crudo es continuo, y se prolonga por largo tiempo, representa una amenaza para zonas sensibles la tarea de contenerlo es compleja y se necesita de muchísimas barreras para parar la constante expansión de la mancha de crudo haciéndose éstas acciones muy costosas y poco practicas, en éstos casos puede resultar conveniente la instalación de una o varias unidades de contención fijas en la zona, de ésta forma puede hacerse mejores pruebas de control, seguimiento y monitoreo de la evolución de la mancha para lograr contener y posteriormente recuperar el crudo con una mejor logística ahorrando costos de traslado de equipos.



Figura 3.19 Barrera contención permanente [38].

Estas instalaciones son eficaces y viables en zonas amenazadas por derrames grandes y prolongados donde se vierten en el mar miles y miles de litros de hidrocarburos, operan también con las barreras mecánicas para optimizar resultados, se necesita de barreras muy resistentes para éste tipo de trabajo ya que por lo general la mancha supervisada está en constante crecimiento, se utilizan más en aguas de poca y mediana profundidad aunque en ocasiones especiales puede instalarse en aguas profundas.

3.3.2.3 Barreras neumáticas

Es un sistema de contención de crudo que consta de una tubería de cierto diámetro y longitud, ésta tubería se instala a cierta profundidad debajo el agua cerca del perímetro de la mancha y cuenta con orificios equidistantes por donde se expulsan burbujas a cierta presión hacia la superficie del agua expandiéndose en el trayecto creando así una corriente ascendente similar a una cortina de aire, las burbujas al llegar a la superficie forman corrientes superficiales que logran contener el desplazamiento natural del derrame de hidrocarburos.

Ventaja:

- Este equipo de contención no interfiere con el paso de cualquier tipo de embarcación.

Desventajas:

- La barrera sólo resulta efectiva en aguas tranquilas y con condiciones ambientales estables ya que el oleaje y las corrientes anularían su efecto.
- La corriente natural del agua pueden producir efectos en el desplazamiento de las burbujas hacia la superficie y si este desplazamiento es mayor de 30°, el efecto de la cortina se rompe permitiendo el paso de gotas de petróleo.

Las desventajas pueden solucionarse aumentando la velocidad de ascenso de las burbujas de aire hacia la superficie del agua. Para ello hay dos alternativas:

- Aumentar la presión de bombeo.
- Aumentar la cantidad de aire que se aplica a través de la tubería.

La superficie de esta barrera es directamente proporcional a la profundidad del agua. Dependiendo de las características de ciertas áreas, como pequeñas bahías y alrededor de pequeños muelles, el uso de una barrera neumática puede ser una alternativa de contención y confinamiento de un derrame de petróleo.

Una instalación típica consta de una tubería sumergida de 30 a 100 metros de longitud, con volúmenes de aire de 0,2 a 1,3 m³/min. La presión de aire a través de la tubería depende de la profundidad del agua. La tubería tienen agujeros colocados cada 30cm y su diámetro varia entre 0.5mm y 0.7mm de acuerdo con la profundidad (agujeros más pequeños son utilizados para mayor profundidad).

Una corriente de 0.75 m/seg es suficiente para romper la cortina de burbujas y permitir el paso del petróleo. Se puede mejorar un poco su efectividad colocando la cortina de burbujas dirigida un ángulo en dirección contraria a la de la corriente. La óptima profundidad de la tubería perforada está entre 3 y 5 m. Desde la superficie del agua hasta el fondo.



Figura 3.20 Estela de burbujas en la superficie del agua de un lago expulsadas de una barrera neumática sumergida. [39].

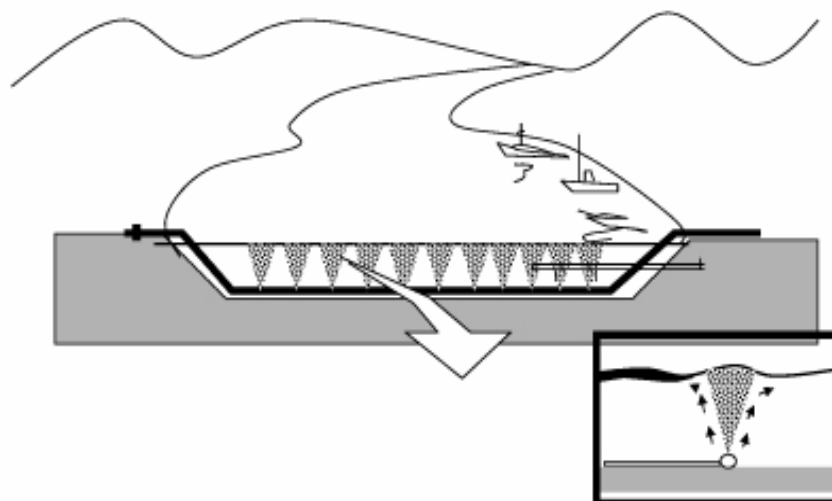


Figura 3.21 Sistema de barrera neumática de aire comprimido [39].

3.3.2.4 Barreras sorbentes

Estos tipos de barrera son ideales para una respuesta rápida parecidas a las barreras mecánicas con la notable diferencia que, además de contener el crudo, poseen pegada a su superficie un material especial con capacidad de absorber los hidrocarburos que hagan contacto con ellas, los materiales absorbentes de éstas barreras no son tóxicos para el hombre ni para el ambiente y tienen propiedades oleofílicas (son afines con el petróleo) e hidrofóbicas (rechazan el agua), pueden absorber hasta 25 veces su propio peso, pueden operar hasta temperaturas de 180 °F lo que las hacen resistentes a las llamas, también son resistentes a la descomposición y al moho, son fáciles de desplegar y recoger.

Existen buena variedad de tamaños y formas tales como partículas sorbentes, paños sorbentes, barreras sorbentes, barredoras y almohadas sorbentes, etc. Son utilizadas principalmente cuando el petróleo derramado está pronto a llegar a las playas, costas, litorales, manglares, riberas, zanjas, arroyos, puertos, muelles, lagunas, lagos, canales o zonas de gran sensibilidad ecológica y turística.



Figura 3.22 Barreras Sorbentes [40].



Figura 3.23 Pañuelos Sorbentes [40].

3.3.2.5 Barreras improvisadas

Muchas veces los accidentes que provocan derrames de petróleo ocurren de forma muy violenta, la marea negra se expande muy rápido provocando un gran daño a la flora y fauna del ecosistema antes de que puedan llegar los equipos profesionales de contención y control. En estos casos se debe actuar inmediatamente de alguna manera para frenar como sea posible la contaminación que avanza, tomar medidas improvisadas a veces es buena opción (quizá la única) para contener o ralentizar el derrame mientras los equipos comerciales están en camino al lugar del accidente.

Las barreras improvisadas pueden ser de cualquier clase de objetos naturales o artificiales que se hacen en las cercanías del siniestro, incluso basura o cualquier cosa cuya aplicación resulte menos tóxica para el ambiente que la mancha negra en sí. Son barreras construidas in situ con materiales comunes, unos utilizados como soporte y otros como absorbentes. Entre ellos: bidones vacíos, bolsas llenas de aire, pacas o balas de paja, postes de madera, tela metálica, troncos, neumáticos de vehículos, colchones, incluso balsas, barcazas, peñeros etc.

Actuar con barreras improvisadas se lleva a cabo sobre todo en aguas poco profundas o en lugares cercanos a las costas donde pueden existir localmente más objetos para improvisar que en mar abierto, esto no quiere decir que ante una situación de derrame en ultramar no se pueda improvisar, mientras haya en las cercanías del accidente los materiales u objetos para construir una cerca improvisada se puede optar por su utilización mientras llega ayuda profesional.

3.3.3 De los equipos propuestos para la recolección de crudo

3.3.3.1 Recolector de discos oleofílicos

Ha sido diseñado como un sistema de desnatado de extrema duración, que combina los dispositivos colectores y de bombeo de hidrocarburos dentro del mismo y tiene un herraje de levante para ser instalado y puesto en operación en el lugar que se requiera para la recolección de hidrocarburos. Posee dos bancos de 22 discos oleofílicos que juntos tienen una capacidad de recuperación de hasta 70 toneladas por hora, su mecanismo de velocidad variable permite operarlo en el rango adecuado para asegurar un mínimo porcentaje de recolección de agua (5%). Es ideal para trabajar en instalaciones fijas o en mar abierto debido a su construcción rígida, y está fabricada con materiales resistentes a la corrosión.

Ésta unidad de potencia hidráulica incluye un motor diesel con un tanque de combustible de 15 galones de capacidad, un tanque para aceite hidráulico con enfriador con capacidad de 25 galones, válvulas de control de flujo dual para control de velocidad del desnatador y la bomba hidráulica de transferencia con capacidad de bombeo de 70 toneladas por hora, arranque eléctrico y panel de control, todo montado en bastidor fabricado en aluminio grado máximo.

El recolector es ubicado en el área donde hay mayor concentración de petróleo o bien la mancha es empujada hacia el recolector, los discos giran a través del crudo y van recogiendo separándolo del agua mientras el crudo se va depositando en un recipiente de recogida especial, todos sus componentes han sido diseñados con materiales anticorrosivos para uso marítimo, puede adaptarse para trabajar en aguas poco profundas ya que existen modelos portátiles de menos capacidad y

de varios tipos, pero éste recolector tiene mejor desempeño y mayor uso en aguas de gran profundidad..



Figura 3.24 Recuperador (Skimmer) de discos Oleofílicos [41].

3.3.3.2 Recolector de cuerda oleofílica

Está diseñado como recuperador de crudo en derrames de hidrocarburos. Puede ser transportado fácilmente por dos hombres, dependiendo el modelo o tamaño, colocado sobre un tambor y puesto en funcionamiento, se trata de una unidad eléctrica que puede recuperar entre 2 y 6 barriles por hora, puede también, ser usado en instalaciones permanentes como dársenas, presas, separadores API de aguas residuales, o en cualquier sitio donde aparezca el problema de recolección de crudo.

El equipo consta de abrazadera especial para montarse sobre un tambor de 200 lts. O cualquier otro tipo de contenedor utilizable. La felpa (cuerda que tiene afinidad o absorbe el petróleo derramado) es exprimida

una vez durante cada paso a través de la maquina por dos rodillos de 4 pulgadas de diámetro. El rodillo está montado en dos brazos cuyo objetivo es ajustar el mecanismo de resorte para embragar los rodillos a presión.

El motor eléctrico de ésta unidad es a prueba de explosión y está acoplado a un reductor de velocidad con flechas en ángulo recto que por medio de una transmisión mecánica a base de cadena de rodillos y catarinas le dan propulsión a los rodillos que impulsan la felpa oleofílica.

De ésta forma la cuerda se sumerge en la mancha de crudo absorbiendo cierta cantidad en toda su longitud sumergida separándolo del agua, ésta cuerda cargada de crudo es exprimida al pasar por la máquina haciendo depositar el crudo en una unidad contenedora que se le adapta al sistema, luego sale sin crudo (o con muy poca cantidad) para volver a sumergirse en el derrame y así continuar su recolección. Es un sistema muy aplicado en aguas de profundidad moderada por ser de menor capacidad que los discos oleofílicos pero es menos costoso y puede ser selectivo para unos crudos más que con otros.



Figura 3.25 Recuperador (Skimmer) de Cuerda Oleofílica [42].

3.3.3.3 Recolector de cinta oleofílica

La unidad de cinta o correas oleofílica opera similar a la de cuerdas y discos, su diferencia radica en la utilización de correas que son sumergidas en el pozo o en el agua que necesita ser limpiada, éstas correas son fabricadas de acero inoxidable, o de poliuretano reforzado con kevlar y con un material absorbente de crudo en su superficie; existen de varios tamaños, modelos y capacidades, desde equipos portátiles de poca capacidad hasta los de mayor carga pueden absorber hasta 12 galones de petróleo por hora y lo transporta, gracias a la acción de un motor eléctrico, hacia un sistema de rasquetas especiales (parecidas al limpia parabrisas de un automóvil) que remueven el crudo de la cinta y lo van depositando en un contenedor adaptado a la máquina, mientras la cinta vuelve a salir de la máquina libre de crudo y así volver a introducirse en el agua para continuar separando el crudo del agua.

Dependiendo el modelo, pueden tener una capacidad recolectora mayor al de algunos modelos de cuerdas oleofílicas pero no mayor a los discos oleofílicos, todos sus componentes son resistentes a la corrosión, son fabricados a prueba de explosión y se utilizan en aguas de profundidad moderada como bahías, lagos etc.



Figura 3.26 Recuperador (Skimmer) de Correa Oleofílica [43].

3.3.3.4 Recolector de vertedero

Este equipo de recuperación, para trabajar en situaciones de productos derramados en el agua, recupera el crudo por la succión generada por una bomba o motobomba, al ingresar la película del hidrocarburo derramado por el anillo colector que se encuentra en el cuerpo central en forma de vertedero, de ésta forma el crudo es succionado a través de una manguera hasta una unidad contenedora en un barco cercano donde luego se separa del agua ligada, el recolector tipo vertedero es apto para la recuperación de productos de baja y media viscosidad.

Tiene una estructura central metálica y 3 flotadores de plástico rotomoldeado, ubicados radialmente en torno al cuerpo colector. En el centro, el anillo colector flotante se une de forma elástica a la estructura,

con una cesta filtrante, lo que le permite colocarse a nivel de la superficie del agua para poder recoger siempre la suciedad y el petróleo flotante en el agua. Cuando se desee reemplazar la cesta para su limpieza el recolector se puede cerrar evitando el paso del agua.

En la base del cuerpo central se fijará una manguera (de succión) hasta la bomba. La capacidad de succión dependerá de la bomba asociada al mismo. Es de fácil operación y manejo, de peso ligero y compacto, los hay de varios modelos siendo todos acoplados con mangueras a una bomba sumergida en el agua, pueden recuperar desde 150 a 440 galones de crudo por minuto, aunque la capacidad de recolección siempre dependerá de la bomba conectada al equipo, generalmente éstos recolectores no exceden los 2 metros de anchura y pueden ser utilizado tanto en puertos como en mar abierto.

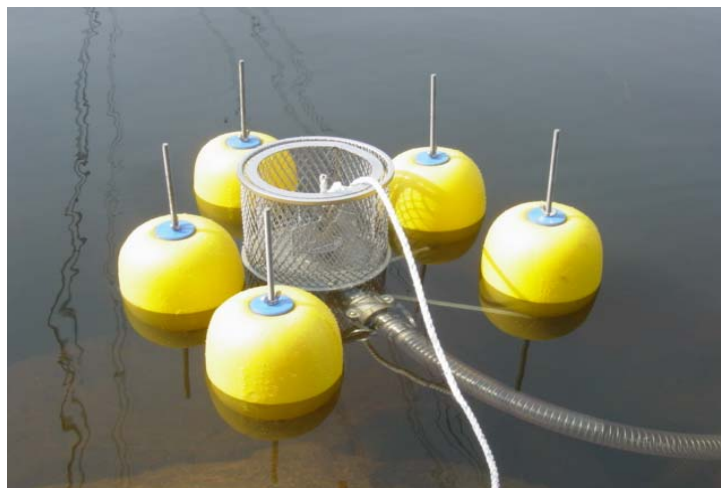


Figura 3.27 Recuperador (Skimmer) de Vertedero [44].

3.3.3.5 Recolector de tambor oleofílico

Particularmente éste recuperador separa el petróleo del agua por la adherencia que se produce sobre la pared del tambor, mientras el mismo gira acostado sobre la superficie a limpiar. A medida que gira el tambor, el

producto recuperado es retirado y vertido en un recipiente colector desde donde es succionado por una bomba. Este tipo de desnatador (Skimmer) es apto para la recuperación de productos pesados y de alta viscosidad.

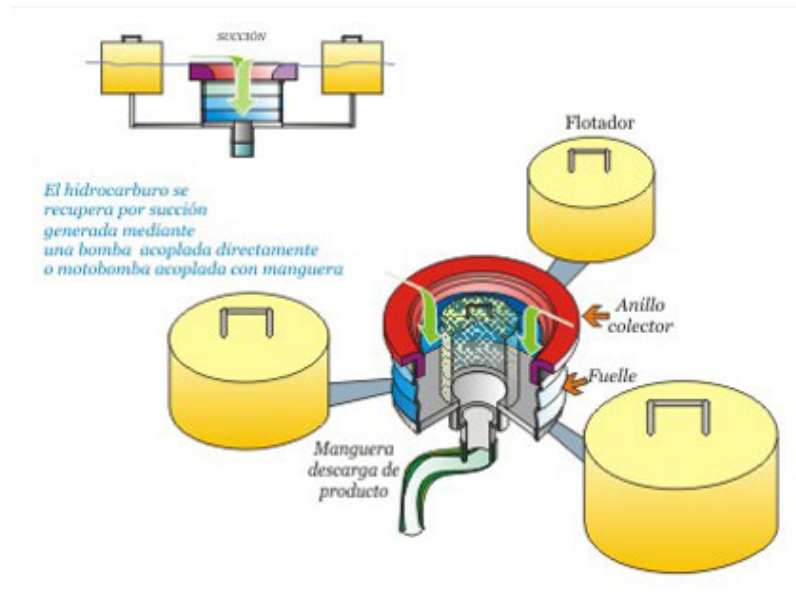


Figura 3.28 Componentes del recuperador de Vertedero [44].

Tiene una estructura metálica, el tambor fabricado se sujeta a 2 flotadores de plástico rotomoldeado, ubicados lateralmente. Los flotadores y el formato cuadrado le dan gran estabilidad y lo habilitan para hacer trabajos en ultramar. Se utiliza una turbina hidráulica para generar el giro del tambor. En la base del cuerpo central se fijará una manguera (de succión) hasta la bomba. La capacidad de succión dependerá de la bomba asociada al mismo.



Figura 3.29 Recuperador (Skimmer) de tambor [45].

3.3.3.6 Recolector de bomba

Abarcan una amplia gama de modelos, tipos, tamaños y potencias, este recolector es una bomba especial, trabaja del mismo modo que las bombas convencionales pero a diferencia de estas, utiliza la presión de agua proveniente de los barcos o terminales para su funcionamiento sin la necesidad de energía eléctrica o motores a explosión.

Esta agua a presión, que pasa a través de una turbina, genera la fuerza motriz necesaria para mover el impulsor de la bomba, a mayor presión de agua se incrementa el caudal de succión de la bomba (a 3 bar de presión se pueden generar 2800 RPM), se la utiliza para el bombeo de productos de media, baja y alta viscosidad. Está fabricada en acero inoxidable, varían de tamaño aunque normalmente tiene 35 cm de alto, pesa aproximadamente 7 kilos, es sumergible y está protegida por sellos mecánicos y rodamientos en baño de aceite. Ideal para trabajos en aguas profundas.



Figura 3.30 Bomba Skimmer [46].



Figura 3.31 Bomba Skimmer [46].

3.3.4 De las propuestas de tratamiento químico

3.3.4.1 Dispersantes

Son agentes de superficie activa, sustancias que disminuyen la tensión superficial del sistema al que se añaden. Cuando cierta cantidad de petróleo se trata con dispersantes y se suministra energía de mezcla, el crudo se rompe en pequeñas gotas y se forma una dispersión en la que la tendencia de estas gotitas a reunirse entre sí es muy pequeña. Pueden ser naturales o sintéticos y son especialmente diseñados para el combate de derrame de crudo de petróleo y otras mezclas de hidrocarburos. Su

formula química es compleja puesto que normalmente no se trata de una única sustancia de superficie activa y además van mezclados con uno o más disolventes que facilitan la mezcla de dichos componentes y el agua e incrementan la estabilidad de la dispersión de hidrocarburos que se obtiene.

Lo ideal es aplicar dispersantes sobre la mancha cuando recién está derramada o lo antes posible, ya que con el correr del tiempo el crudo irá perdiendo su capacidad de dispersión, mientras más tiempo permanezca el crudo en el agua, éste se irá meteorizando de tal modo que se vuelve más viscoso y denso, puesto que la evaporación y otros factores hacen volatilizar los componentes livianos del petróleo quedando en el agua los más pesados. Aún así se han utilizado dispersantes con cierto éxito en derrames de hidrocarburos con más de una semana. Naturalmente eso depende en gran medida del grado de emulsificación el cual se ve afectado por muchos factores tales como el tipo de hidrocarburos, condiciones climáticas y condiciones del mar. Los dispersantes deben ser diluidos con agua de mar si se aplican desde un buque en movimiento lento, esto es para mantener un flujo adecuado a través de la boquilla del asperjador, se requieren equipos extras en el buque para controlar la velocidad y dilución de la aplicación. La ventaja de esta aplicación es que el dispersante vertido no se ve afectado por cualquier viento y la estela que deja el buque puede ayudar a la acción de mezclado y dispersión del crudo, pero tiene la desventaja de que solo pueden tratarse áreas pequeñas.

La aplicación por medio de aeronaves es lo contrario, se pueden aplicar directamente sin diluirlos con agua de mar, pueden tratarse áreas muy grandes con gran rapidez pero el gradiente del viento puede hacer que el dispersante se aleje de su objetivo viéndose afectada su aplicación. Muchas veces los encargados de respuesta no tienen opción,

ya que no siempre hay aeronaves, equipo de aplicación y personal entrenado disponible para la aplicación de dispersantes por aire.

Es necesario comenzar una pre-planificación con los organismos gubernamentales competentes. Los posibles usuarios de dispersantes deben comprender claramente las leyes y reglamentos vigentes, saber cuándo y donde el gobierno permitirá el uso de dispersantes, el uso de qué dispersante está autorizado y qué medidas se requieren antes de que se otorgue permiso para aplicar dispersantes.



Figura 3.32 Dispersante aplicado desde un buque [47].



Figura 3.33 Dispersante aplicado desde una aeronave [47].

3.3.4.2 Aglutinantes

Son Sustancias que al agregársele al hidrocarburo permiten que su mancha derramada en el mar permanezca junta. También son llamados aglomerantes, éstos materiales son capaces de unir fragmentos de una o varios tipos de crudo derramado y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos; en los conglomerantes es mediante procesos químicos.

Los aglomerantes hidráulicos se utilizan en derrames petroleros para aglutinar y endurecer al crudo y así, con la ayuda de colectores químicos de petróleo que puedan dirigir el derrame a un área más pequeña y ser controlados con mayor facilidad por medio de barreras mecánicas, pueda ser contenido y posteriormente recogido con más facilidad hacia un recuperador de producto. Al igual que los dispersantes, la aplicación de un aglutinante debe hacerse tan pronto como sea posible, después de haberse producido un derrame ya que estos productos pierden eficiencia cuando el petróleo ya ha sufrido degradación, o ha formado emulsiones o si previamente se han utilizado los mencionados dispersantes.

La cantidad a utilizar de este aglomerante de petróleo, dependerá de las características del petróleo derramado y de las condiciones ambientales (tiempo, viento y corrientes) en general, la dosis es del orden de 2.5 a 5 litros por Km lineal del perímetro de la mancha.

3.3.4.3 Aditivos biológicos

Se trata de microorganismos (principalmente bacterias) que se añaden al agua (o al suelo) para incrementar la velocidad de degradación de un sustrato orgánico, como por ejemplo un crudo o un subproducto suyo derramado. Habitualmente precisan de la adición de elementos

nutrientes para incrementar su velocidad de crecimiento y su capacidad de biodegradación.

Dichos productos químicos y organismos aumentan la velocidad de la biodegradación natural del petróleo. Este es un proceso en el que las bacterias, hongos y levaduras descomponen (para obtener los nutrientes y la energía) compuestos complejos en compuestos más simples. La biodegradación del petróleo es un proceso que puede ocurrir muy lentamente, tomando años para eliminar los aceites esparcidos en el medio acuático. Para rápida eliminación de los vertidos de hidrocarburos de las costas y los humedales es necesario reducir al mínimo el posible daño ambiental en estos hábitats sensibles.

La tecnología de biorremediación puede acelerar el proceso de biodegradación mediante la adición de materiales como fertilizantes o microorganismos con el medio ambiente. Dos técnicas de biorremediación que se están utilizando actualmente en los EE.UU. para limpieza de derrames de petróleo son la siembra y la fertilización.

La siembra trata la adición de microorganismos al crudo como algunas especies de bacterias que, naturalmente, no existen allí. El objetivo es aumentar la población de microorganismos que pueden biodegradar el derrame de petróleo. Y la fertilización es el enriquecimiento de nutrientes, proceso en el que los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo se agregan a un medio ambiente contaminado, como un derrame de petróleo.

Por lo general los suministros de estos nutrientes en la naturaleza ayudan a controlar el crecimiento de la población de microorganismos nativos. Cuando más se añaden nutrientes, los microorganismos nativos

aumentan rápidamente, lo que podría aumentar la tasa de biodegradación de los hidrocarburos derramados.

Los agentes biológicos son recomendables en líneas costeras, litorales, manglares y playas, aunque se pueden utilizar en gran proporción en derrames costa afuera, son muy versátiles en su aplicación y no tienen efectos nocivos para el ambiente.



Figura 3.34 Ensayo de laboratorio con agentes biológicos para biorremediación en derrames de petróleo [48].

3.3.4.4 Combustión “in situ”

También denominada quema “in situ” o incineración “in situ” es una técnica utilizada a veces por personas que responden a un derrame de petróleo y consiste en la quema controlada de crudo que se ha derramado desde un buque, instalación, o pozo terrestre o marino; se realiza en el mismo lugar del derrame. Cuando se realiza correctamente, la incineración in situ reduce significativamente la cantidad de petróleo sobre el agua y reduce al mínimo los efectos adversos del petróleo en el medio ambiente. Normalmente, el crudo se enciende con un encendedor de mano o con un encendedor suspendido de un helicóptero. La quemadura

debe realizarse cuando la capa de petróleo sea lo suficientemente gruesa, por lo general alrededor de 1 / 10 de pulgada o de 2 a 3 milímetros, cuando el espesor es menor a éstas medidas, el calor suministrado se pierde en el agua y la combustión cesa rápidamente, como también debe hacerse la quema bajo condiciones climáticas tranquilas y corrientes marítimas calmadas, todo esto constituyen una traba y desventaja para la aplicación de éste método.

Una de sus ventajas es que reduce en gran medida la necesidad de almacenamiento y eliminación de crudo recogido más los residuos que genera. Éste tipo de acciones se recomienda realizar en lugares alejados de la costa para evitar que las corrientes de los vientos arrastren las llamas a lugares sensibles cercanos. En mar abierto, la quema in situ se realiza comúnmente con dos embarcaciones con un remolque resistente en forma de "U". El extremo abierto de la U es maniobrado a través de la mancha de petróleo recogéndolo, de ésta forma es remolcado y concentrado para quemarlo, debe realizarse con un estricto monitoreo aunque en ocasiones, si el derrame ocurre en pantanos, o en superficies de agua helada, la quema in situ puede resultar el único método efectivo; a quema in situ, sin embargo, debe complementarse, con otros medios de respuesta a derrames.

Cuando ocurre un derrame, es mejor reducir al mínimo la propagación de la marea negra y eliminar la mayor cantidad de aceite como sea posible en el sitio del derrame. La quema in situ puede proporcionar un método de respuesta para ayudar a lograr este objetivo. En buenas condiciones la quema in situ se da de forma rápida, y es una forma relativamente eficiente de quitar el crudo derramado en el agua.



Figura 3.35 Incineración “in situ” en derrame del Golfo de México [49].

3.3.4.4.1 Agentes de combustión

Compuestos o materiales inflamables que se usan para la ignición y combustión de sustancias que por si solas no arderían o que lo harían con dificultad, como ocurre con un derrame de crudo. Para ello inducen un efecto mecha o acción capilar que arrastra al crudo hacia la interfase con el aire y hacia la llama. De esta manera se facilita su combustión, ya que por medio de esta acción capilar el crudo es aislado artificialmente del contacto con el agua y por tanto disminuye el efecto refrigerante de la misma. Estos agentes pueden utilizarse para la combustión de derrames de hidrocarburos, como forma de eliminarlos in situ.



Figura 3.36 Agentes de combustión INQUIFUEL [50].

3.3.4.5 Gelificantes

Estas sustancias se conocen como solidificadores porque reaccionan con el crudo para formar sólidos con contextura de goma. Cuando se produce un derrame importante, dichos productos químicos se aplican a los derrames de petróleo, mezclados con la fuerza de presión de flujos de agua. Una vez que se han formado los geles de petróleo se retiran del agua con las redes, aspirándolos hacia arriba, o desnatando la superficie con equipos recuperadores. A veces, este el crudo se mezcla con gel de petróleo combustible y se reutiliza.

Los gelificantes se pueden utilizar en mares moderadamente calmados, las olas proporcionan energía suficiente para mezclar los productos químicos con el crudo. Para tener éxito, una gran cantidad de gelificantes debe aplicarse, a veces hasta tres veces el volumen del derrame por lo que no resulta muy viable cuando son derrames muy grandes; si hay un derrame de petróleo muy elevado, de millones de galones, también es poco práctico para almacenar, mover o aplicar la cantidad enorme de productos químicos que se necesitan para el gel de petróleo.



Figura 3.37 Geles de petróleo recuperados en el derrame de crudo del Golfo de México [51].

3.4 Seleccionar las propuestas más adecuadas para el control del derrame de crudo

3.4.1 Evaluación de las propuestas

3.4.2 Metodología

A través de una investigación documental se recopiló información de periódicos, revistas, noticias de televisión, boletines informativos, tesis, manuales físicos y digitales, hojas de seguridad, libros y páginas de Internet sobre los diferentes tipos de accidentes que han derivado en derrames de crudo hacia el medio ambiente a lo largo de la historia de la industria de explotación y transporte del petróleo en los últimos 50 años.

Con la información obtenida se pudo conocer los detalles que tuvieron fuerte repercusión antes, durante y después de cada uno de los derrames petroleros, detalles tales como las fechas, operaciones, causas de accidentes, naturaleza y gravedad del siniestro, crudo derramado y las estrategias exitosas empleadas para frenar, reducir, eliminar y remediar el fuerte impacto ecológico que ha sufrido el planeta por negligencia humana.

Un seguimiento detallado se realizó a cada accidente, (importante señalar que desde 1960 han ocurrido aproximadamente 130 accidentes de derrame de crudo), y a sus estrategias de contingencia para hacer un estudio que permita evaluar y comparar entre sí de forma conceptual cuáles equipos, tratamientos y métodos, que fueron exitosos en circunstancias y accidentes similares al de la Plataforma Deepwater Horizon, a fin de establecer las propuestas que puedan dar mejores resultados para controlar un derrame de crudo como el ocurrido en el Golfo de México el 20 de Abril de 2010.

Para la evaluación de los diferentes métodos de control propuestos anteriormente se utilizó el Método del Análisis Estructural el cual se aplica a través del siguiente procedimiento:

- Se establecieron los factores de evaluación sobre la base de las características resaltantes que afectan cada una de estrategias propuestas para cada etapa fundamental de control de derrame de crudo.
- Se jerarquizará la importancia de cada factor dentro del contexto de requerimientos, mediante la asignación de un peso porcentual a cada uno de ellos, utilizando la metodología del análisis estructural para la evaluación de los factores.

- Se estableció una escala de evaluación para indicar el comportamiento de cada método de control propuesto con respecto al factor de evaluación analizado.
- La evaluación parcial de cada método propuesto con respecto al factor analizado, se obtendrá de la multiplicación del peso asignado al mismo por la calificación alcanzada dentro de la escala de medición.
- La evaluación total para cada método propuesto resultará de la sumatoria de las evaluaciones parciales. Debe hacerse una matriz de evaluación total para cada etapa fundamental de control.
- Finalmente se seleccionó como mejor método de cada etapa fundamental, aquel que haya obtenido mayor puntuación dentro de su evaluación total.

3.4.3 Metodología de análisis estructural para determinar y ponderar los factores que afectan a los métodos propuestos de control de derrame.

Para la evaluación de los factores a considerar para la selección de los métodos y la posterior ponderación se procederá a:

1. Identificación de aquellos posibles factores a evaluar, los cuales se fijaron con el establecimiento de los métodos de control propuestos y las premisas para combatir el derrame de crudo de la plataforma Deepwater Horizon. Ver tabla 3.5.

Tabla 3.5. Posibles factores para evaluar los métodos propuestos

Número asignado	Descripción
1	Pérdidas por Impacto ecológico
2	Cantidad de crudo derramado
3	Ubicación de la fuente de contaminación
4	Condiciones climáticas
5	Transporte y manejo
6	Disponibilidad de Equipos
7	Costo

Fuente: Elaboración propia

2. Crear la matriz de análisis estructural, determinando cómo los factores influyen unos sobre otros. Ver tabla 3.6

Influencia real (1) vs. Influencia nula (0).

Tabla 3.6 Matriz de análisis estructural de los factores

Nº	Influencia/sobre	Influencia Directa							Independencia	
		1	2	3	4	5	6	7	Total	
1	Pérdidas por Impacto ecológico	0	0	0	0	1	1	1	3	
2	Cantidad de crudo derramado	1	0	0	0	1	0	1	3	
3	Ubicación de la fuente de contaminación	1	0	0	0	1	1	1	4	
4	Condiciones climáticas	1	1	0	0	1	0	1	4	
5	Transporte y manejo	0	0	0	0	0	0	1	1	
6	Disponibilidad de equipos	0	0	0	0	1	0	1	2	
7	Costo	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Dependencia	total	3	1	0	0	5	2	6	17

Fuente: Elaboración propia

El factor N° 3 (Ubicación de la fuente de contaminación) y el N° 4 (Condiciones climáticas) son los que mayor influencia tienen sobre los demás, debido a que su independencia es 4. Ver tabla 3.6

El factor N° 7 (Costo) es el más subordinado ya que su dependencia es 6.

Tabla 3.7 Valores de independencia y dependencia directos de cada factor con sus correspondientes porcentajes.

Factores		Independencia	%	Dependencia	%
1	Pérdidas por Impacto ecológico	3	17,65	3	17,65
2	Cantidad de crudo derramado	3	17,65	1	5,88
3	Ubicación de la fuente de contaminación	4	23,53	0	0
4	Condiciones climatológicas	4	23,53	0	0
5	Transporte y manejo	1	5,88	5	29,41
6	Disponibilidad de equipos	2	11,76	2	11,76
7	Costo	0	0	6	35,29
	Total	17	100	17	100

Fuente: Elaboración propia

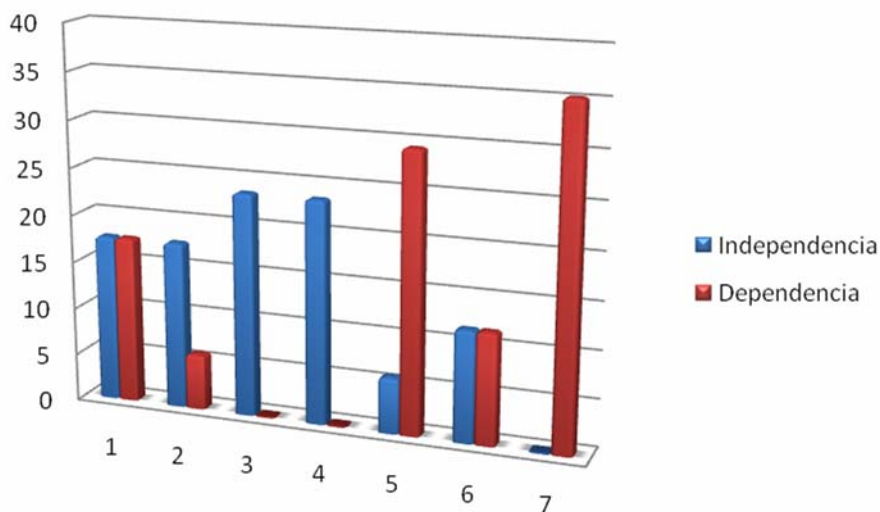


Figura 3.38 Relación entre índice de independencia e índice de dependencia.

3. La relación entre independencia y dependencia se estudia ubicando los factores en el plano cartesiano (Figura 3.39)

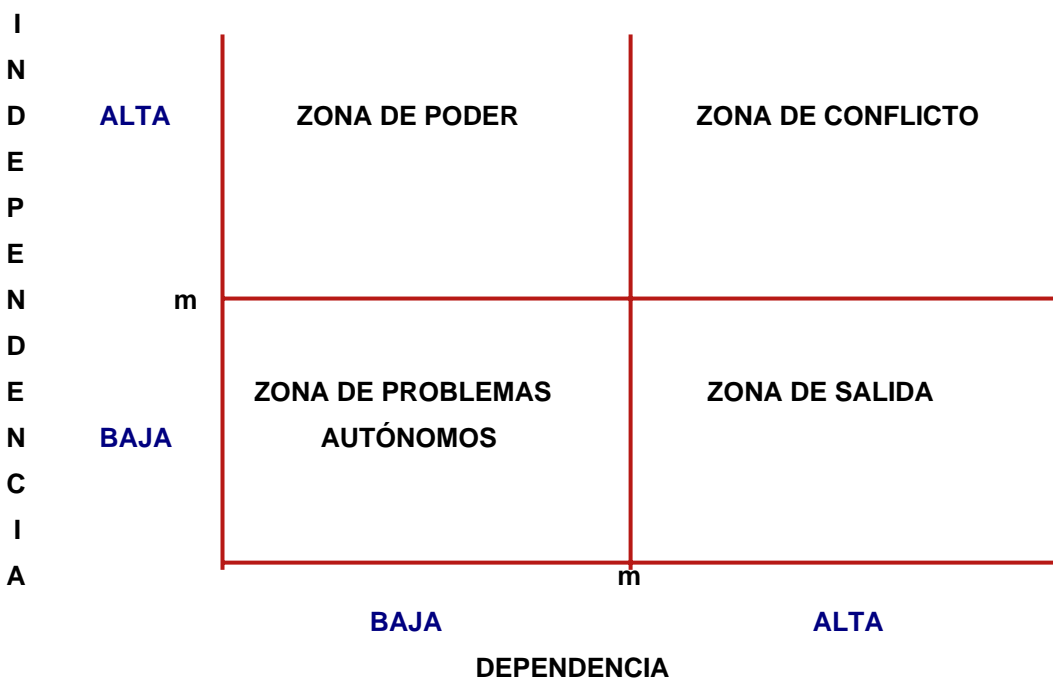


Figura 3.39 Zonas en las que se divide el plano

Fuente: Elaboración propia.

Para lograr ubicar las distintas actividades en el eje cartesiano, se toma el promedio de los valores de cada uno como índice, $m = 100/7$, $m = 14.28$, $m \approx 14$.

En la zona de poder se encuentran los factores que tienen independencia mayor de 14% y la dependencia entre 0 y 14%, dentro de éste grupo se encuentran los factores:

- Ubicación de la fuente de contaminación.
- Condiciones climatológicas.
- Cantidad de crudo derramado.

En la zona de conflicto se hallan los de alta independencia, mayor que 14%, y alta dependencia mayor a 14%. Dentro de éste grupo se encuentra el factor:

- Pérdidas por Impacto ecológico.

En la zona de salida están aquellos factores que son productos de los anteriores; se caracterizan por tener baja independencia (<14%), pero alta dependencia (>14%), dentro de este grupo se encuentran los factores:

- Costo
- Transporte y manejo

En la zona de problemas autónomos están los de poca independencia (<14%), y poca dependencia (<14%), dentro de este grupo se posiciona el factor:

- Disponibilidad de Equipos

4. Ponderación de los factores a considerar:

Los factores considerados son aquellos que se encuentran en la zona de poder y en la zona de conflicto ya que están sobre o por encima del promedio de su independencia.

Tabla 3.8 Factores considerados con sus respectivas ponderaciones.

Nº	Descripción	Independencia	Ponderación
1	Ubicación de la fuente de contaminación	4	0,29
2	Condiciones climatológicas	4	0,29
3	Cantidad de crudo derramado	3	0,21
4	Pérdidas por Impacto ecológico	3	0,21
	Total	14	1,00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.1 Justificación de la ponderación de los factores

La ponderación o peso que obtuvieron cada uno de los factores considerados, se basan en un procedimiento donde se evaluaron los valores de independencia y dependencia directos de cada factor, estos valores fueron determinados previamente a través de una matriz de análisis estructural que define cual o cuáles factores son los que tienen mayor incidencia sobre todos los demás factores estudiados.

3.5.3.2 Escala de evaluación

Para medir o indicar el comportamiento de cada método propuesto con respecto al factor de evaluación analizado, se utilizará la siguiente escala de evaluación.

ESCALA	COMPORTAMIENTO
10	Idóneo
5	Aceptable
1	Inapropiado

3.4.4 Características de los métodos propuestos para la eliminación de la fuente, contención de crudo derramado, recuperación de hidrocarburos y tratamiento químico

Las observaciones, características, diferencias, aplicaciones, ventajas, desventajas y manejos de los métodos propuestos de cada etapa fundamental de control se describen con detalle en el capítulo 3.3 de éste trabajo (*Diferencia en la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo*). Las descripciones realizadas de cada estrategia se analizan y se enfrentan con los factores considerados, que a su vez afectan, en cierta medida, a cada uno de los métodos de todas las etapas fundamentales para darles una puntuación dentro de la escala antes citada de 1, 5 y 10.

A continuación se presentan unas tablas que indican la valoración de cada método propuesto de acuerdo con los factores más importantes considerados que afectan a cada una de las etapas fundamentales de

control, con la finalidad de conocer cuales son los métodos más apropiados de cada etapa y así poder seleccionar los que posean mayor puntaje según las consideraciones de esta investigación.

Tabla 3.9 Ejemplo de calificación del método Desviar La Producción para eliminación de la fuente de contaminación en base a los factores considerados.

Métodos Propuestos	Factores considerados			
	Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Perdidas Impacto ecológico
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación
Apuntalamiento				
Cerrar Múltiples de producción				
Desviar Producción	5	5	10	10
Grapas de Seguridad				
Taponamiento con campana				
Cementación de pozo				
Trasiego de Tanqueros				

3.4.4.1 Criterio de evaluación

Con el ejemplo del método de eliminación de la fuente de contaminación (Desviar la Producción) apreciado en la tabla 3.9; se muestra la calificación dada a ése método según sus ventajas y desventajas estudiadas en el capítulo 3.3; para cada uno de los factores considerados.

De esta forma recibe una puntuación de 5, es decir aceptable, ante la ubicación de la fuente de contaminación porque, a pesar de ser útil para recuperar crudo, éste método por si solo no constituye una solución definitiva ante derrames provenientes de pozo tan profundos donde la operatividad es muy riesgosa, impredecible y compleja y se necesita sellar el pozo en lugar de desviar la producción, lo mismo sucede ante las fuertes condiciones climáticas de vientos y corrientes a esas latitudes, ya que dificulta a un más mantener éste proceso por periodos largos de tiempo.

Sin embargo, Desviar la Producción, recibe la mejor calificación ante el factor de cantidad de crudo derramado ya que éste método tiene como principal finalidad recuperar la producción, que se hubiera derramado al mar, en vez de sellar el pozo, lo que disminuye la cantidad de crudo que contamina al ambiente marino reduciendo en consecuencia las pérdidas por impacto ecológico.

De la misma forma se procede a evaluar todos los demás métodos de cada etapa fundamental de control de derrame de crudo para ir obteniendo datos suficientes en la construcción de las matrices finales de evaluación. Ver tablas 4.1; 4.2; 4.3 y 4.4.

Tabla 3.10 Ejemplo de matriz de evaluación del método Desviar La Producción para eliminación de la fuente de contaminación en base a los factores considerados

Métodos Propuestos		Factores de Evaluación con sus pesos respectivos				Evaluación Total
		Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Perdidas Impacto ecológico	
		Peso: 0,29	Peso: 0,29	Peso: 0,21	Peso:0,21	
Apuntalamiento	Calificación					
	Evaluación					
Cerrar Múltiples de producción	Calificación					
	Evaluación					
Desviar Producción	Calificación	5	5	10	10	7,1
	Evaluación	1,45	1,45	2,1	2,1	
Grapas de Seguridad	Calificación					
	Evaluación					
Taponamiento con campana	Calificación					
	Evaluación					
Cementación de pozo	Calificación					
	Evaluación					
Trasiego de Tanqueros	Calificación					
	Evaluación					

3.4.5 Muestra de cálculo

Continuando con el ejemplo del método “Desviar La Producción” se realiza los siguientes cálculos para la obtención de su evaluación total.

Se multiplica la ponderación del factor, ubicación de la fuente de contaminación, por la calificación del método dada ante ése factor.

Ponderación del factor x calificación del método = evaluación parcial.

$$0,29 \times 5 = 1,45$$

El valor de **1,45** representa su evaluación parcial, o su evaluación ante el factor de ubicación de la fuente de contaminación, asimismo se procede con cada uno de los factores para obtener sus correspondientes evaluaciones parciales.

Las evaluaciones parciales se suman cada una para ése método, se obtiene así su evaluación total

$$1,45 + 1,45 + 2,1 + 2,1 = 7,1$$

El valor de **7,1** (dentro de una escala del 1 al 10) representa la evaluación total de ése método, desviar la producción, es decir, el máximo valor que la matriz aporta para ése método en particular, las evaluaciones totales de cada uno de los métodos se comparan a través de matrices de evaluación que determinan cuales métodos son los más adecuados, se escoge aquel método que posea la mayor evaluación total para combatir un derrame petrolero como el de la Plataforma Deepwater Horizon. Los resultados se muestran en la tabla 4.5; 4.6; 4.7 y 4.8.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción de las condiciones actuales del derrame de crudo en la plataforma Deepwater Horizon en el golfo de México

La explosión, hundimiento y posterior derrame de la plataforma petrolera Deepwater Horizon ocurrida del 20 de abril de 2010, se debió a una serie de fallas humanas; no se reforzaron debidamente las medidas de seguridad para la exploración y producción de un pozo de las condiciones del Proyecto Macondo, se habla de fallas en las válvulas de seguridad, fallos en el proceso de cementación, falta de centralizadores suficientes, uso inadecuado del sistema de revestimiento, fallo en el sistema de prevención de explosiones y otra serie de posibles causas que aún no se han aclarado por completo. Obviamente ante tantos defectos en la seguridad la plataforma estaba sentenciada al trabajar en un pozo con tanta presión (sobre los 6100 psi), cualquiera que sea la causa exacta del accidente, está claro que hubo una especie de golpe ascendente de gas y una explosión que derivó en una arremetida incontrolada del petróleo y de flujo de gas hasta la plataforma en la superficie. Se supone que los sistemas de seguridad de la plataforma debieron evitar que esto ocurra.

A todas estas, se derramó en el mar más de 626.200.000 Litros de crudo (4.400.000 barriles), durante varios meses, es decir, 18 veces más crudo derramado que el accidente del Exxon Valdez, toda una catástrofe económica y ambiental de grandes proporciones que pudo haber sido evitada, aún así, después de ocurrido el accidente pudo haberse reducido bastante la cantidad de crudo derramado si las autoridades competentes hubiesen tenido a tiempo un plan de contingencia eficaz para derrame de

grandes proporciones considerando las condiciones del clima, profundidad, oscuridad y frío característicos de la ubicación del pozo.

La empresa Petrolera Británica BP, responsable de los hechos, perdió mucho tiempo y dinero en fracasados intentos para eliminar la fuente de contaminación, sin poder detener el crudo que continuaba fluyendo al mar. Finalmente tras estudiar la situación, durante pleno derrame, los responsables lograron aplicar los métodos exitosos ante la ubicación y condiciones particulares del pozo averiado.

El estudio de los desastres petroleros permite conocer cómo actuar ante determinadas situaciones; las empresas petroleras deben tener en cuenta una pre-planificación, un estudio antes y no durante el accidente, para actuar frente a derrames de pozos antes de ponerlos a producir, ya que los accidentes ocurren ante cualquier descuido.

4.2 Elaboración de propuestas para la minimización del derrame de crudo en función de las etapas fundamentales de control

Hoy en día se utilizan diferentes métodos para hacer frente a derrames de petróleo, incluyendo todo tipo de barreras mecánicas, equipos recolectores (skimmers), agentes biológicos, combustión controlada y gelificantes. Cada uno tiene una función en la limpieza y en velocidad con que las aguas del medio ambiente pueden ser devueltas a un estado anterior al vertido contaminante.

Sin embargo, aun conociendo cuáles son los métodos para atacar el problema, las acciones pueden resultar poco eficientes si no se tiene un plan previo que permita hacer un estudio amplio sobre un derrame producido y así utilizar una combinación de métodos fundamentales de control de crudo que permita recuperar la máxima cantidad de crudo

posible, eliminar el porcentaje no recuperable y las demás estrategias a fin de reducir la contaminación ambiental del modo más eficaz.

El presente estudio plantea una serie de métodos como propuestas para enfrentar derrames petroleros, basándose en un seguimiento documental realizado a accidentes de derrames de crudo. Algunas de estas estrategias se han utilizado con éxito en accidentes petroleros del pasado. Para reducir la contaminación derivada de la plataforma Deepwater Horizon se propusieron los siguientes métodos:

4.3 Diferencia en la aplicación de cada propuesta elaborada según las etapas fundamentales de control de derrame de crudo.

Una vez propuesto los métodos considerados, la investigación documental se enfocó en aquellos accidentes petroleros, específicamente los de plataformas en ultramar, donde hayan sido utilizados los métodos propuestos, así se conoció las características, ventajas, desventajas, lugares y condiciones de aplicación de los mismos para cada una de las etapas fundamentales de control (eliminación de la fuente, contención recuperación y tratamiento químico), con estos conocimientos se establecen comparaciones conceptuales de dichos métodos para analizar sus importancias y eficiencias en los diversos tipos de accidentes de derrames de petróleo donde han tenido éxito.

4.4 Seleccionar las propuestas más adecuadas para el control del derrame de crudo.

De acuerdo a la frecuencia de utilización, resultados, costos, facilidad de manejo, transporte y almacenaje, pérdidas por impacto ambiental, disponibilidad y otros factores, se pudo realizar un balance con una escala establecida que facilitó la selección de los mejores métodos y

equipos a través de una metodología evaluación y de análisis estructural mostrada en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Puntuación de cada método propuesto para eliminación de la fuente de contaminación en base a los factores considerados.

Métodos Propuestos	Factores considerados			
	Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Pérdidas Por Impacto ecológico
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación
Apuntalamiento	1	1	1	5
Cerrar Múltiples de producción	1	1	1	1
Desviar Producción	5	5	10	10
Grapas de Seguridad	1	1	1	1
Taponamiento con campana	10	10	10	10
Cementación de pozo	10	10	10	10
Trasiego de Tanqueros	1	1	1	1

Tabla 4.2 Puntuación de cada método propuesto para la contención del crudo derramado en base a los factores considerados.

Métodos Propuestos	Factores considerados			
	Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Pérdidas Por Impacto ecológico
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación
Barreras Mecánicas	10	5	5	10
Instalaciones Permanentes	1	5	1	10
Barreras Neumáticas	1	1	1	10
Barreras Sorbentes	5	5	5	5
Barreras Improvisadas	1	1	1	1

Tabla 4.3 Puntuación de cada equipo propuesto para la recolección de crudo derramado en base a los factores considerados.

Equipos Propuestos recuperadores	Factores considerados			
	Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Pérdidas Por Impacto ecológico
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación
De Discos oleofílicos	10	10	10	10
De Cuerdas y correas oleofílicas	5	5	5	10
De tambor oleofílico	10	5	5	10
De Vertedero	1	1	5	10
De Bomba	10	10	10	10

Tabla 4.4 Puntuación de cada equipo propuesto para los tratamientos químicos en base a los factores considerados.

Métodos Propuestos	Factores considerados			
	Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Pérdidas por Impacto ecológico
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación
Dispersantes	10	5	5	5
Aglutinantes	5	5	5	5
Aditivos biológicos	5	5	1	10
Combustión "in situ"	10	5	10	5
Gelatinizantes	5	10	1	5

Tabla 4.5 Matriz de evaluación de los métodos para eliminar la fuente

Métodos Propuestos		Factores de Evaluación con sus pesos respectivos				Evaluación Total
		Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Pérdidas Impacto ecológico	
		Peso: 0,29	Peso: 0,29	Peso: 0,21	Peso:0,21	
Apuntalamiento	Calificación	1	1	1	5	1,84
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	1,05	
Cerrar Múltiples de producción	Calificación	1	1	1	1	1
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	0,21	
Desviar Producción	Calificación	5	5	10	10	7,1
	Evaluación	1,45	1,45	2,1	2,1	
Grapas de Seguridad	Calificación	1	1	1	1	1
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	0,21	
Taponamiento con campana	Calificación	10	10	10	10	10
	Evaluación	2,9	2,9	2,1	2,1	
Cementación de pozo	Calificación	10	10	10	10	10
	Evaluación	2,9	2,9	2,1	2,1	
Trasiego de Tanqueros	Calificación	1	1	1	1	1
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	0,21	

Tabla 4.6 Matriz de evaluación de los métodos para la contención del crudo

Métodos Propuestos		Factores de Evaluación con sus pesos respectivos				Evaluación Total
		Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Perdidas Impacto ecológico	
		Peso: 0,29	Peso: 0,29	Peso: 0,21	Peso:0,21	
Barreras Mecánicas	Calificación	10	5	5	10	7,5
	Evaluación	2,9	1,45	1,05	2,1	
Instalaciones Permanentes	Calificación	1	5	1	10	4,05
	Evaluación	0,29	1,45	0,21	2,1	
Barreras Neumáticas	Calificación	1	1	1	10	1
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	0,21	
Barreras Sorbentes	Calificación	5	5	5	5	5
	Evaluación	1,45	1,45	1,05	1,05	
Barreras Improvisadas	Calificación	1	1	1	1	1
	Evaluación	0,29	0,29	0,21	0,21	

Tabla 4.7 Matriz de evaluación de los equipos para recuperar crudo

Equipos Recolectores de:		Factores de Evaluación con sus pesos respectivos				Evaluación Total
		Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Perdidas Impacto ecológico	
		Peso: 0,29	Peso: 0,29	Peso: 0,21	Peso: 0,21	
Discos Oleofílicos	Calificación	10	10	10	10	10
	Evaluación	2,9	2,9	2,1	2,1	
Cuerdas y Correas Oleofílicas	Calificación	5	5	5	10	6,05
	Evaluación	1,45	1,45	1,05	2,1	
Tambor Oleofílico	Calificación	10	5	5	10	7,5
	Evaluación	2,9	1,45	1,05	2,1	
Vertedero	Calificación	1	1	5	10	3,73
	Evaluación	0,29	0,29	1,05	2,1	
Bomba	Calificación	10	10	10	10	10
	Evaluación	2,9	2,9	2,1	2,1	

Tabla 4.8 Matriz de evaluación de los métodos de tratamiento químico

Métodos Propuestos		Factores de Evaluación con sus pesos respectivos				Evaluación Total
		Ubicación de la fuente de contaminación	Condiciones climáticas	Cantidad de crudo derramado	Perdidas Impacto ecológico	
		Peso: 0,29	Peso: 0,29	Peso: 0,21	Peso:0,21	
Dispersantes	Calificación	10	5	5	5	6,45
	Evaluación	2,9	1,45	1,05	1,05	
Aglutinantes	Calificación	5	5	5	5	5
	Evaluación	1,45	1,45	1,05	1,05	
Aditivos Biológicos	Calificación	5	5	1	10	5,21
	Evaluación	1,45	1,45	0,21	2,1	
Combustión "In Situ"	Calificación	10	5	10	5	7,5
	Evaluación	2,9	1,45	2,1	1,05	
Gelatinizantes	Calificación	5	10	1	5	5,61
	Evaluación	1,45	2,9	0,21	1,05	

De esta forma se escogieron aquellos métodos que obtuvieron la mayor puntuación dentro de sus matrices de evaluación con la finalidad de plantear una solución para reducir la contaminación causada por una catástrofe petrolera ocurrida el 20 de Abril de 2010 en la Plataforma Deepwater Horizon en el Golfo de México, en aguas estadounidenses frente a las costas de Lousiana.

4.4.1 Métodos seleccionados para controlar el accidente y reducir la contaminación

De acuerdo con el comportamiento de cada método propuesto con respecto a los factores de evaluación establecidos, los métodos considerados más apropiados y viables de cada etapa fundamental de control para combatir un accidente petrolero de naturaleza,

características, ubicación y condiciones como el de la Plataforma Deepwater Horizon, se presentan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Métodos seleccionados para controlar el accidente y reducir la contaminación

Etapa Fundamental	Método Seleccionado	Puntuación Total
Eliminación de la fuente de contaminación	Taponamiento con campana	10 de 10
	Cementación	10 de 10
Contención del crudo derramado	Barreras Mecánicas	7,5 de 10
Recuperación del crudo derramado	Equipo de recolección de Discos Oleofílicos	10 de 10
	Equipo de recolección por Bomba	10 de 10
Tratamiento químico	Incineración “In Situ”	7,5 de 10

4.4.1.1 Análisis de los resultados

4.4.1.1.1 Métodos seleccionados para eliminar la fuente de contaminación

Taponamiento con campana: A pesar de ser una opción costosa y de compleja aplicación, es el método que mejor puede controlar la fuente de contaminación cuando se encuentra localizada a tan baja profundidad en el lecho marino, tuvo la máxima puntuación en la matriz de evaluación frente a los factores considerados (10/10). Ningún buzo puede sumergirse a esos niveles y ningún robot hubiera podido dar mejores resultados de

control que el taponamiento con campana, éste método ayuda al proceso de cementación, ante un pozo con tanta presión y flujo incontrolado de crudo, la cementación fracasaría sin el taponamiento con campana.

Cementación del pozo averiado: Método que también se alzó con la máxima puntuación en la matriz de evaluación (10/10), esto deja claro que si la fuente del derrame proviene de un pozo fuera de control como en éste caso, la cementación tanto en la superficie como en el fondo del pozo es una operación obligatoria, de ésta forma se sella un pozo definitivamente, sin dejar de efectuar el seguimiento, monitoreo y pruebas de rigor posteriores a la cementación.

4.4.1.1.2 Método seleccionado para contener y concentrar la expansión del crudo derramado

Las barreras mecánicas: Preferiblemente las inflables de tipo cortina; sus respectivos modelos y tamaños así como su facilidad de manejo y almacenaje constituyen un método muy práctico, económico, versátil, de fácil transporte y altamente eficaz para contener una mancha de petróleo flotante en el mar, ésta combinación de sus ventajas son importantes a la hora de dar rápida respuesta a un derrame de crudo, su disponibilidad y variedad de dimensiones hacen que puedan ser útiles en derrames pequeños y grandes. En la matriz de evaluación las barreras mecánicas obtuvieron una puntuación total de 7,5/10; mayor a todos los demás métodos en la etapa fundamental de contención de derrame de crudo.

Cabe señalar que las barreos sorbentes, son las segundas en cuanto a puntuación en ésta etapa de contención (con un valor de 5/10). Representan un método opcional, aplicables sobretodo cuando el crudo derramado amenaza con llegar a zonas muy sensibles al petróleo, como playas, costas, parques nacionales, manglares, etc; en desastres tan

grandes como el de la plataforma Deepwater Horizon siempre se debe contar con barreras sorbentes para las zonas sensibles cercanas al accidente pues los fuertes vientos y corrientes pueden arrastrar al crudo hacia esas zonas y también éstas barreras se emplean como modo de recuperar algo de crudo.

4.4.1.1.3 Equipos seleccionados para la recuperación del crudo derramado

La recolección de crudo es un paso tan importante como los demás, desde el punto de vista económico como de mitigar el impacto ecológico, si los derrames son grandes, conviene varios equipos que recuperen tanto crudo como sea posible, en ésta etapa fundamental los dos métodos siguientes obtuvieron la máxima puntuación (10/10) dentro de la matriz de evaluación.

El recolector de discos oleofílicos: Es un equipo fuerte, robusto y resistente que además de poseer una gran capacidad recolectora permite combinarse con las barreras mecánicas (que hacen el trabajo de cercado y concentración) para recoger crudo con más eficiencia y rapidez; una buena estrategia y acciones con éstos recolectores puede dar magníficos resultados en derrames de gran magnitud.

Recolectores de Bomba: En todo derrame costa afuera, siempre hay manchas de crudo de diferentes tamaños considerables que flotan dispersas o apartadas de la mancha principal, los recolectores de bomba son eficientes para succionar estas manchas aun cuando ya se hayan meteorizado bastante, estos equipos de bombas recolectoras de crudo pueden recuperar hidrocarburos muy viscosos.

4.4.1.1.4 Método seleccionado como tratamiento químico

Ayudar al ambiente a volver a sus condiciones naturales lo más rápido posible es el objetivo más importante, los tratamientos químicos son los adecuados para ayudar al ambiente a recuperarse pero deben realizarse lo más pronto posible luego de ocurrido un derrame para que éstos puedan rendir mejor, estos agentes químicos degradan, solubilizan o eliminar los hidrocarburos en cuestión de minutos y horas lo que la misma naturaleza puede hacer pero tardaría muchos años.

La Combustión “in situ”: Fue el método escogido, con puntuación de 7,5/10 en su evaluación total dentro de la matriz de los tratamientos químicos. A pesar de todos los tratamientos y métodos aconsejables, en todo derrame de grandes proporciones existen gran cantidad de crudo que no es rentable recuperar o tratar, es necesario eliminarlos de la zona afectada. La combustión “in situ” a pesar de ser un tratamiento más físico que químico, se escoge como forma de eliminar gran cantidad de hidrocarburos con ayuda de agentes de combustión de ser necesario; cuando los derrames son muy grandes y extensos, muchas veces no se cuenta con los agentes químicos o equipos de contención y recolección suficientes para recuperar o degradar tanto crudo, la quema “in situ” es un método viable en ultramar bajo condiciones climáticas optimas para atacar al problema de forma directa reduciendo la cantidad de hidrocarburos derramados.

Es importante recordar que los dispersantes son muy recomendados en derrames costa afuera, en aguas de gran profundidad, alejado de áreas sensibles; bajo estas condiciones puede aplicarse buena cantidad de dispersantes aprovechando las olas y corrientes marinas para mejor dispersión sin el temor de que los agentes dispersantes puedan hacer algún impacto en arrecifes o zonas susceptibles a éstos. Es por esto que

los dispersantes se posicionaron de segundo lugar en la evaluación total de la matriz de los tratamientos químicos, con una puntuación de 6,45/10.

Ninguno de los métodos fundamentales de control de derrame de petróleo recomendados en este trabajo, eliminarán el problema por completo por sí solos, las estrategias que para un derrame fueron exitosas, pueden no serlo para otro, es necesaria una pre-planificación y estudio de cada derrame en particular para conocer cual combinación de éstos métodos permitirá acabar de forma limpia, rápida y eficiente con accidentes de éste tipo en el futuro.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. Fallas en la cementación, centralizadores, válvulas y sistemas de seguridad provocaron la explosión y el hundimiento de la plataforma de exploración y extracción Deepwater Horizon.
2. La cantidad total de crudo derramado al mar, desde que se inició el derrame hasta el sellado definitivo del pozo (aproximadamente durante 3 meses), fueron 4.9 millones de barriles (776 millones de litros).
3. Las pérdidas provocadas por el accidente fueron de aproximadamente 8.000 millones de dólares, de los cuales 428 millones corresponden a pagos de indemnización a territorios afectados.
4. Los métodos exitosos utilizados por la compañía británica petrolera BP para poner fin al derrame de crudo en el Golfo de México, fueron el taponamiento con campana y la cementación de pozo.
5. De acuerdo con la investigación documental y el estudio realizado a través de la técnica del análisis estructural, los métodos seleccionados para el control de derrame de crudo, son:
 - ✓ Taponamiento con campana y Cementación de pozo ambos con una puntuación de 10/10 para eliminar la fuente de contaminación.
6. Después del sellado definitivo del pozo fuera de control, los métodos post mortem más apropiados para contener, recuperar y eliminar crudo derramado en el mar, son:

- ✓ Barreras mecánicas inflables tipo cortina con puntuación de 7,5/10 para la contención del crudo derramado en el mar.
- ✓ Recolector de discos oleofílicos y recolector de bomba con puntuación de 10/10 como equipos idóneos para recuperar crudo derramado en el mar.
- ✓ Incineración “in situ”. Con puntuación de 7,5/10 como método adecuado para eliminar el crudo flotante en el mar.

5.2 Recomendaciones

1. Aumentar la proliferación de la educación ambiental evaluando otras alternativas energéticas menos contaminantes.
2. Los gobiernos de aquellos países que posean petróleo deben auditar los estudios exhaustivos que se le hagan a los yacimientos y pozos de hidrocarburos a fin de certificar sus condiciones y características reales para el empleo de una tecnología segura para su exploración y producción.
3. Establecer mejores planes de contingencia antes de la exploración y/o producción de un pozo de petróleo para dar rápida respuesta ante cualquier accidente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mujica García, M., **“Estudio de la dispersión unidimensional de manchas de hidrocarburos en agua de mar”** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2007).
2. Arcia, López, y otros; **“Derrame de Petróleo en Agua”** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería de Petróleo, UDO – Monagas, Maturín (2004)
3. Maestre, José A., **“Uso de dispersantes en la aceleración del proceso de biomedicación en derrames de petróleo”**, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (1999)
4. Patete C. y Brito E., **“Determinación de la contaminación por hidrocarburos en sedimentos marinos en la bahía de bergantín”** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (1983)
5. **“Plataforma Petrolera”** (Junio. 2010); http://es.wikipedia.org/wiki/Plataforma_petrol%C3%ADfera
6. **“Deepwater Horizon”** (Junio. 2010); http://es.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon
7. **“Derrame de Petróleo”** (Junio 2010); http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/aproot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D2_ENERGIA/D2_GLOS_ENERGIA.htm
8. **“Derrames Petroleros en el agua”** (junio 2010); <http://www.monografias.com/trabajos15/derramespetroleros/derrames-petroleros.sht>
9. **“México Ambiental”** (junio 2010); <http://www.mexicoambiental.com/mexico/contaminacion.html>
10. **“Derrame en el Golfo (1), razón y sinrazón en accidentes ambientales”** (junio 2010); <http://caracas1067.wordpress.com/2010/05/22/derrame-en-el-golfo-razon-y-sinrazon-en-accidentes-ambientales/>
11. **“BP en vivo y directo desde el Golfo de México”** (Julio, Agosto y Septiembre 2010); <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=9034366&contentId=7063636>
12. **“Plataforma Petrolera Brasileña”** (Julio 2010); <http://es.globalvoicesonline.org/2009/05/27/brasil-temas-de-petroleo-elecciones-y-pobreza/>

13. **“Barco Sonda Repsol”** (Julio 2010); <http://www.elconfidencialdigital.com/Articulo.aspx?IdObjeto=22886>
14. **“Ilustraciones Francisco Reyes Palma”** (Julio 2010); http://biblioteca.digital.ilce.edu.mx/sites/colibri/cuentos/agua/htm/sec_2.htm
15. **“Perforaciones para almacenar gas”** (Julio 2010); <http://www.lasprovincias.es/v/20100713/comunitat/perforaciones-para-almacenar-costa-20100713.html>
16. **“Hundimiento de la Plataforma Aban Pearl”** (Julio 2010); <http://www.reportero24.com/2010/05/13/chavez-anuncia-hundimiento-de-la-plataforma-gasifera-aban-pearl/>
17. **“Barcazas de Uruguay”** (Julio 2010); <http://www.ecouruguay.org/xnwslite.php?m=amp&nw=MTE4Mg==>
18. **“Crisis en el golfo de México”** (Agosto 2010); <http://cultivodamente.blogspot.com/2010/09/crisis-del-golfo-de-mexico.html>
19. **“Catástrofe Petrolera”** (Agosto 2010); <http://www.generacion.com/noticia/61080/derrame-crudo-golfo-mexico-recien-llamado-catastrofe-por-bp-petroleum>
20. **“Contaminación de las aguas”** (Agosto 2010); <http://www.monografias.com/trabajos55/contaminacion-de-agua/contaminacion-de-agua3.shtml>
21. **“Derrame de petróleo en el Río De La Plata”** (Agosto 2010); http://www.prensamericosur.com.ar/apm/nota_completa.php?idnota=322
22. **“El verdadero efecto ecológico de un derrame de crudo”** (Agosto 2010); <http://www.comisionanticrisis.com/el-verdadero-efecto-ecologico-del-derrame-comienza-a-conocerse/2010/07/19/>
23. **“Explota plataforma petrolífera en el Golfo de México”** (Agosto 2010); <http://www.periodistadigital.com/periodismo/otros-medios/2010/09/03/explota-otra-plataforma-petrolifera-en-el-golfo-de-mexico.shtml>
24. **“Natura – Medio Ambiental”** (Agosto 2010); <http://www.natura-medioambiental.com/2010/08/encuentran-microbios-que-habrian.html>
25. **“Hundimiento de la Plataforma Deepwater Horizon”** (Agosto 2010); http://alt1040.com/2010/06/el-hundimiento-de-la-plataforma-deepwater-horizon-de-bp-captada-en-fotografias/horas_posteriores

26. **“BP da buenas señales en contención de derrame”** (Agosto 2010); http://www.bbc.co.uk/mundo/internacional/2010/05/100526_0402_vertido_bp_operacion_top_kill_golfo_jg.shtml
27. **“Peligros y Dificultades de la estrategia Bottom Kill”** (Agosto 2010); <http://www.spiegel.de/international/world/0,1518,700759,00.html>
28. **“El petróleo sigue Fluyendo”** (Septiembre 2010); <http://www.spiegel.de/fotostrecke/fotostrecke-55948-2.html>
29. **“BP comienza taponeo de forado en el Golfo de México”** (Agosto 2010); http://www.ciudadvirtual.cl/noticias/terraverde/index.cfm?id_cat=1001&idpost=18623&idblog=62&titulo_url=BP_comienza_taponeo_de_forado_en_Golfo_de_Mexico
30. **“Inicia fin de desastre ambiental”** (Agosto 2010); <http://www.laprensa.com.ni/2010/08/05/internacionales/33636>
31. **“Facilidades de superficie en la industria petrolera”** (Agosto 2010); <http://www.monografias.com/trabajos72/facilidades-superficie-industria-petrolera/facilidades-superficie-industria-petrolera3.shtml>
32. **“Perforación direccional”** (Agosto 2010); <http://www.monografias.com/trabajos67/perforacion-horizontal-dirigida/perforacion-horizontal-dirigida2.shtml>
33. **“Fracasa primer intento de taponar pozo dañado en el Golfo de México”** (Agosto 2010); <http://www.rtve.es/noticias/20100508/fracasa-primer-intento-taponar-pozo-petroleo-golfo-mexico/330600.shtml>
34. **“Trasvasado de buque”** (Agosto 2010); <http://forum.paradoxplaza.com/forum/showthread.php?208102-El-destructor-Jos%E9-Luis-D%E9dez>
35. **“Contención”** (Agosto 2010); http://www.cethus.org/mar_limpio/conseccion_s1.html
36. **“Impactos en la hidrosfera”** (Agosto 2010); <http://urdanetacmc1epr26.wikispaces.com/5.+Mareas+negras>
37. **“Barreras de contención para interior de puertos”** (Agosto 2010); http://www.quiminet.com/ar5/ar_vcdRsDFarmAAss-barreras-de-contencion-para-interior-de-puertos.htm
38. **“Barrera SIGMA para Contención Permanente”** (Agosto 2010); <http://www.abasco.net/barrerassigma.html>

39. **“Aire comprimido”** (Septiembre 2010); http://www.territorioscuola.com/wiki/pedia/es.wikipedia.php?title=Aire_comprimido
40. **“Elementos de combate a la contaminación”** (Septiembre 2010); http://www.directemar.cl/spmaa/Medio%20Ambiente%20%28Internet%29/ccont/m_usua.html
41. **“Recolector de Petróleo (Skimmer)”** (Septiembre 2010); <http://www.solosocks.com.br/venda-produtos/energia-meio-ambiente/outros-energia-meio-ambiente/skimmer-recolhedor-de-oleo-232441>
42. **“Desnatadores para separar petróleo del agua”** (Septiembre 2010); <http://www.abasco.net/desnatadoresparaseparar.html>
43. **“Desaceitador de cinta de gran capacidad”** (Septiembre 2010); <http://www.directindustry.es/prod/abanaki-oil-skimmer-division/desaceitador-de-cinta-de-gran-capacidad-17917-382045.html>
44. **“Desnatadora Flotante de Aceite”** (Septiembre 2010); <http://spanish.alibaba.com/product-tp/floating-oil-skimmer-100317224.html>
45. **“Desnatador de tambor”** (Septiembre 2010); <http://www.cadictechnologies.com/skimmers.aspx>
46. **“Bomba para líquidos viscosos”** (Septiembre 2010); http://www.aguamar.ket.com/sql/productos/index_subcateg.asp?idsubcategoria=1145&categoria=Bombas+L%EDquidos+Viscosos
47. **“Guía para el uso de dispersantes en derrame de hidrocarburos”** (Septiembre 2010); http://www.oilproduction.net/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=245:guia-para-el-uso-de-dispersantes-en-derrames-de-hidrocarburos&catid=61:seguridad&Itemid=125
48. **“Proyectos Actuales”** (Septiembre 2010); http://www.etc-cte.ec.gc.ca/estd_west/estdwest_current_s.html
49. **“Quema de petróleo en el Golfo de México”** (Septiembre 2010); http://www.nola.com/news/gulf-oil-spill/index.ssf/2010/07/burning_and_flaring_of_oil_lea.html
50. **“Industrias Químicas granadinas”** (Septiembre 2010); http://www.quimicasgranadinas.com/ui/productosIndustria_3.aspx
51. **“Continúa Sangrando el Golfo”** (Septiembre 2010); <http://www.mrdj1.com/2010/05/la-vena-aorta-de-nuestro-planeta-y-su.html>

GLOSARIO

Anóxicos: Ausencia de oxígeno.

ANSI: (ANSI) Instituto de Estándares Nacional Americano (American National Standards Institute). Organización privada no lucrativa que administra y coordina estándares, sistemas voluntarios y las actividades relacionadas a la evaluación de conformidad en los Estados Unidos.

Antropogénico: Se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana. Normalmente se usa para describir contaminaciones ambientales en forma de desechos químicos o biológicos como consecuencia de las actividades económicas, tales como la producción de dióxido de carbono por consumo de combustibles fósiles.

API: La gravedad API, de sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*, es una medida de densidad que describe cuán pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en ésta. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo.

Craqueo: Proceso químico por el cual se quiebran moléculas de un compuesto produciendo así compuestos más simples.

Diagénesis: Es el proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de compactación.

Diapiros: Son estructuras geológicas intrusivas, formadas por masas de evaporitas (sales, anhidrita y yeso) procedentes de niveles estratigráficos

muy plásticos sometidos a gran presión, ascienden por las capas sedimentarias de la corteza terrestre, atravesándolas y deformándolas, en un lento proceso medible en millones de años que se conoce como diapirismo.

Dosaje: Prueba que mide la presencia de hidrocarburo en medio acuoso.

Emulsión: Es una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).

Hidrocarburos Aromáticos: Los hidrocarburos aromáticos o de serie BENCENICA son no saturados, de cadena cerrada, cuyo tipo es el benceno. Su fórmula es: $C_n H_{2n - 6}$ Todos estos hidrocarburos se encontrarán en estado gaseoso, líquido y aún sólido según sean las condiciones de temperatura y presión y según su peso molecular.

Hidrocarburos Nafténicos: Son hidrocarburos saturados, pero de cadena cerrada, denominándose con el prefijo CICLO, ejemplo: ciclopropano, ciclobutano, ciclopentano, etc. La fórmula general es: $C_n H_{2n}$

Hidrocarburos Parafinados: Responden a la fórmula: $C_n H_{2n + 2}$ y sus átomos de carbono están dispuestos según una cadena abierta recta.

Hidrófilo: es el comportamiento de toda molécula que tiene afinidad por el agua. En una disolución o coloide, las partículas hidrófilas tienden a acercarse y mantener contacto con el agua.

Meteorización: Es la desintegración y descomposición de una roca o una sustancia en la superficie terrestre o marina como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos, con la participación de agentes biológicos.

Lipofílica: Afinidad con las grasas, ser disuelto en ellos o absorberlos.

Oxidación Fotoquímica: Oxidación por acción del oxígeno atmosférico, aún en dilución en disolventes orgánicos, para convertirse en óxido. Esta reacción es lenta e irreversible.

Surfactantes: Los agentes activos superficiales o surfactantes (derivado del inglés surface active agents) son moléculas que contienen un segmento liposoluble (soluble en aceite) y otro hidrosoluble (soluble en agua). La solubilidad parcial tanto en agua como en aceite permite al surfactante ocupar la interfase. Los agentes de actividad superficial son sustancias químicas que reducen la tensión superficial de los líquidos.

Agentes Tensoactivos: Son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (p.ej., dos líquidos insolubles uno en otro).

Tensión Interfacial: La energía libre existente en la zona de contacto de dos líquidos inmiscibles. Esta energía es consecuencia de las tensiones superficiales de los dos líquidos, y evita que se emulsiones espontáneamente.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	COMPARACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MÉTODOS PARA EL CONTROL DEL DERRAME DE CRUDO EN LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON EN EL GOLFO DE MÉXICO
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Pita, Ramón A.	CVLAC: 17.409.337 E MAIL: ramonp2010@gmail.com
Rojas R., Milinys del V.	CVLAC: 11.904.872 E MAIL: milinys@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Control derrame

Deepwater

Etapas de control

Golfo de México.

Crudo

Impacto ambiental

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En las últimas décadas ha crecido la industria petrolera en el mar, gracias a descubrimientos de nuevos y grandes yacimientos de petróleo costa afuera; la seguridad para trabajar en plataformas petroleras en ultramar es estricta debido a tantos equipos sensibles operando en poco espacio, esto acarrea un riesgo inherente tanto en la propia plataforma como en el pozo que se explora y produce, ello, sumado a malas maniobras, ha producido explosiones, derrames, fugas y todo tipo de accidentes en plataformas como la Deepwater Horizon, éstos desastres suceden con relativa frecuencia, y por ello surge la necesidad de investigar los métodos mas apropiados para reducir la contaminación ambiental derivada de los mismos, el presente trabajo toma como patrón de estudio la catástrofe de la plataforma Deepwater Horizon ocurrida el 20 de Abril de 2010, realizando un seguimiento documental de los hechos para formular propuestas de control de derrames de crudo y empleando una metodología estructural de matrices de evaluación y selección se escogieron los métodos más apropiados de cada una de las etapas fundamentales, resultando el taponamiento con campana y cementación (ambos con 10/10) como métodos de eliminación de la fuente; las barreras mecánicas (con 7,5/10) para contención de derrame; los recolectores de discos oleofílicos y recolectores de bomba (ambos con 10/10) para la recuperación de crudo derramado y la incineración “in situ” (con 7,5/10) como tratamiento químico, de ésta manera se aporta importantes nociones a la hora de elaborar un plan de contingencia que se aplique con mejor eficiencia, rapidez y con la mayor armonía posible con el ecosistema marino, en indeseables derrames de petróleo a futuro.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Ferreira, Nelson	ROL	CA	AS(X)	TU	JU(X)
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	08	12
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Comparacion.control.derrame.deepwater.doc	Aplication/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1
2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de ingeniería química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Pita, Ramón A.

AUTOR

Rojas R., Milinys del V.

AUTOR

Ing. Nelson Ferreira

TUTOR / JURADO

Ing. Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS