

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE
TRATAMIENTO Y OPCIONES DE DISPOSICIÓN DE
DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS
COSTA AFUERA**

GUSTAVO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2005**

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE
TRATAMIENTO Y OPCIONES DE DISPOSICIÓN DE
DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS
COSTA AFUERA**

GUSTAVO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

**Director
FERNANDO CALVETE
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2005**

...la opinión es la expresión aparentemente racionalizada del gusto.

José Saramago

A mi familia
A mi padre y a mi madre
A mis hermanas
A Aura María
A los grandes maestros
A los compañeros de vida

Gustavo

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento especial a:

Ingeniero Fernando Calvete, director del proyecto, al Ingeniero Carlos Reyes Serpa, al Ingeniero Carlos Amaya y al Ingeniero Milton José Rodríguez por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y al Instituto Colombiano del Petróleo.

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE TRATAMIENTO Y OPCIONES DE DISPOSICIÓN DE DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS COSTA AFUERA *

AUTOR: GUSTAVO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ **

PALABRAS CLAVE: Metodología, desechos de perforación, tratamiento, disposición, costa afuera.

RESUMEN

Las operaciones de perforación costa afuera generan una gran cantidad de desechos que requieren de un adecuado manejo para minimizar o eliminar el impacto sobre el medio ambiente marino.

El objetivo principal de este proyecto es estudiar los procesos de tratamiento y las opciones de disposición de los desechos de perforación generados costa afuera para plantear los métodos más recomendables a usarse en trabajos exploratorios y de eventual desarrollo en el mar Caribe colombiano.

La metodología propuesta está basada en el análisis de los diferentes procesos de tratamiento y de las opciones de disposición y en la definición de una serie de criterios de selección que permitan indicar la forma más adecuada de manejar los desechos en el mar. Los criterios son: tipo de lodo, profundidad del agua y la perforación, distancia a la costa, características físicas y operacionales del equipo de perforación, condiciones climatológicas, consideraciones ambientales y factor económico. Se presentan dos casos de estudio para la aplicación de la metodología a las condiciones del Caribe colombiano.

Este proyecto puede emplearse en el diseño de planes de manejo ambiental dentro de la programación de la perforación costa afuera. Además, constituye para la academia una herramienta de consulta que proporciona información acerca de los tipos de lodo usados, estado actual de las tecnologías de manejo de los desechos, potencial impacto ambiental y regulaciones correspondientes.

* Tesis de pregrado

** Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Director de proyecto: Ing. Fernando Calvete.

TITLE: EVALUATION METHODOLOGY FOR TREATMENT PROCESS AND DISPOSAL OPTIONS OF OFFSHORE DRILLING WASTE*

AUTHOR: GUSTAVO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ**

KEYWORDS: Methodology, drilling waste, treatment, disposal, offshore.

ABSTRACT

Offshore drilling operations generates a lot of drilling waste that need an adequate management to minimize the impact on marine environment.

The project main objective is to study the process treatments and the disposal options applied to offshore drilling wastes to select the best management option in the Colombian Caribe sea.

The methodology is based on the options management analysis and the definition of seven selection criterions. The criterion are: type of drilling mud, water and drilling depth, distance to shore, drilling rig features, weather conditions, environmental aspects and cost considerations. Two study cases are presented to apply the methodology with Colombian Caribe sea conditions.

This project can be used to design environmental management plans for offshore drilling programs. Furthermore, it is a consult tool that gives information about types of mud, waste management technologies state of art, potential environmental impact and related regulations.

* Degree Project

** Petroleum Engineering School. Universidad Industrial de Santander. Director: Ing. Fernando Calvete.

CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	16
1.	GENERALIDADES	18
2.	LODOS DE PERFRORACIÓN	20
2.1	COMPONENTES BÁSICOS DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	20
2.1.1	Agentes pesantes	20
2.1.2	Viscosificadores	21
2.1.3	Adelgazantes	21
2.1.4	Controladores de pérdida de filtrado	22
2.1.5	Químicos comerciales	22
2.1.6	Polímeros sintéticos solubles en agua	22
2.2	TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN	22
2.2.1	Lodos Base Agua	23
2.2.2	Lodos Base Aceite	24
2.2.3	Lodos Base Sintética	26
3	PROCESOS DE TRATAMIENTO APLICADOS A LOS DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS COSTA AFUERA	28
3.1	PROCEDENCIA DE LOS DESECHOS DE PERFORACIÓN	29
3.1.1	Cortes de perforación	29
3.1.2	Lodos de perforación	31
3.2	PROCESOS DE TRATAMIENTO	35

3.2.1	Procesos costa afuera	36
3.2.1.1	Control de sólidos	36
3.2.1.1.1	Zarandas vibratorias	40
3.2.1.1.2	Hidrociclones	41
3.2.1.1.3	Desarenadores	42
3.2.1.1.4	Desarcilladores	42
3.2.1.1.5	<i>Mud cleaner</i> o Limpialodos	42
3.2.1.1.6	Centrífugas	43
3.2.1.1.7	Secadores de cortes. Prensa limpiadora	46
3.2.1.2	Limpieza de cortes	48
3.2.1.3	Almacenamiento y manejo de los cortes	49
3.2.2	Procesos en tierra	50
3.2.2.1	Tratamientos Térmicos	50
3.2.2.1.1	Procesos de incineración	51
3.2.2.1.1.1	Horno rotatorio	52
3.2.2.1.1.2	Lecho fluidizado	53
3.2.2.1.2	Pirolisis	53
3.2.2.1.3	Sistemas de desabsorción térmica	54
3.2.2.1.4	Infrarrojo	55
3.2.2.2	Tratamiento Químico y Físicos	55
3.2.2.2.1	Solidificación, estabilización y encapsulación	55
3.2.2.2.2	Micro-encapsulación con sílice	56
3.2.2.2.3	Extracción con solvente	57
3.2.2.3	Biotratamientos	58
3.2.2.3.1	Rellenos (<i>Landfarming</i>)	58
3.2.2.3.2	<i>Landspreading</i>	59
3.2.2.3.3	Compostaje	60
4.	DISPOSICIÓN DE DESECHOS DE	61

	PERFORACIÓN GENERADOS COSTA AFUERA	
4.1	DESCARGA	61
4.1.1	Descarga de lodos base agua	63
4.1.2	Descarga de lodos base aceite	65
4.1.3	Descarga de lodos base sintética	65
4.1.4	Costos asociados	65
4.2	REINYECCIÓN	66
4.2.1	Costos asociados	72
4.3	DISPOSICIÓN EN TIERRA	74
4.4	ANÁLISIS DE COSTOS	76
4.4.1	Tiempo de perforación	76
4.4.2	Consumo de lodo de perforación	77
5	NORMAS AMBIENTALES	78
5.1	SISTEMAS DE REGLAMENTACIÓN	78
5.2	SISTEMAS INTERNACIONALES Y REGIONALES	79
5.2.1	Convención OSPAR	81
5.3	SISTEMAS NACIONALES	83
5.3.1	Normatividad Federal para los Estados Unidos	84
5.3.1.1	Acta del Agua Limpia (<i>Clean Water Act CWA</i>)	84
5.3.1.2	Código Federal de Regulaciones (CFR)	85
5.3.1.3	Título 40. Protección del medio ambiente	85
5.3.2	Agencias reguladoras	85
5.3.2.1	Servicio de Manejo de Minerales (MMS)	86
5.3.2.1.1	Disposición de desechos	86
5.3.2.1.2	Criterios para la inyección	86
5.3.2.1.3	Criterios para la encapsulación	86
5.3.2.2	Agencia para la Protección del Medio Ambiente	87

	(EPA)	
5.3.2.2.1	Mejor Tecnología de Control Posible Actualmente Disponible (BPT)	87
5.3.2.2.2	Mejor Tecnología Convencional para el Control de la Contaminación (BCT)	87
5.3.2.2.3	Mejor Tecnología Disponible Económicamente Viable (BAT)	87
5.3.2.2.4	Estándares de Desempeño para Fuentes Nuevas (NSPS)	88
5.3.2.2.5	Mejores Prácticas de Manejo (BPM)	88
5.3.2	COLOMBIA	89
5.3.2.1	Protección del Medio Marino y Costero	89
5.3.2.2	Fuentes de Contaminación	89
5.3.2.3	Acciones	90
5.3.2.4	Ministerio del Medio Ambiente	90
5.3.2.5	Plan Nacional de Contingencia (PNC)	92
6	METODOLOGÍA	94
6.1	Criterios de selección	94
6.1.1	Tipo de lodo	94
6.1.2	Profundidad del agua y de la perforación	95
6.1.3	Distancia a la costa	95
6.1.4	Características físicas y operacionales del equipo de perforación	95
6.1.5	Condiciones climatológicas	95
6.1.6	Consideraciones ambientales	96
6.1.7	Factor económico	96
7	CASOS ESTUDIO	97

7.1	CASO A	100
7.1.1	Proceso de tratamiento a los desechos de perforación	101
7.1.2	Opción de disposición	102
7.2	CASO B	103
7.2.1	Proceso de tratamiento a los desechos de perforación	105
7.2.2	Opción de disposición	105
8	CONCLUSIONES	107
9	RECOMENDACIONES	109
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
	BIBLIOGRAFÍA	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Vida marina creciendo en un sitio de descarga de cortes (SBM)	34
FIGURA 2.	Sistema de control de sólidos para OBM y SBM	38
FIGURA 3.	Zaranda vibratoria	40
FIGURA 4.	Centrífuga	44
FIGURA 5.	Secador de cortes vertical	47
FIGURA 6.	Cortes secos	48
FIGURA 7.	Tanque de almacenamiento	50
FIGURA 8.	Horno rotatorio	53
FIGURA 9.	Sistema de desabsorción térmica	54
FIGURA 10.	Relleno	59
FIGURA 11.	Tratamiento de desechos por compostaje.	60
FIGURA 12.	Descarga de lodos base sintética	66
FIGURA 13.	Equipo compacto para operaciones de reinyección costa afuera	69
FIGURA 14.	Inyección en pozo de disposición e inyección anular	70
FIGURA 15.	Profundidad del agua para el Caso A y Caso B	98
FIGURA 16.	Diagrama del sistema de control de sólidos para WBM. Caso A	102
FIGURA 17.	Diagrama del sistema de control de sólidos para SBM. Caso B	106

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	Ventajas y desventajas de la descarga	64
TABLA 2.	Ventajas y desventajas de la reinyección de cortes	73
TABLA 3.	Parámetros para evaluar las opciones de disposición	75

INTRODUCCIÓN

Impulsar la actividad exploratoria en el Caribe colombiano, caracterizado por su alto potencial de albergar crudos livianos y gas, hace parte de la transformación que la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A. está desarrollando para convertirse en una empresa competitiva, con mayor eficiencia administrativa y operacional.

Como parte de esta actividad se encuentra la caracterización geológica de una amplia zona del mar Caribe colombiano de 4.4 millones de hectáreas comprendida entre las Islas del Rosario, en Cartagena, y el Cabo de la Vela, en La Guajira. El objetivo es “lograr la mejor radiografía del subsuelo marino colombiano que le apunte a la búsqueda de un potencial de 3.700 millones de barriles de petróleo equivalente”*. Luego se procederá a la interpretación de la información recogida y a la ubicación de posibles áreas de perforación.

La perforación costa afuera implica superar retos tecnológicos y ambientales asociados a condiciones climatológicas adversas de corrientes marinas, oleaje, vientos, tormentas y huracanes; aguas profundas y ultra profundas e impactos generados por desechos producidos.

El objetivo primordial de este proyecto es estudiar los procesos de tratamiento y las opciones de disposición de los desechos de perforación

* ECOPETROL: “Carta Petrolera.” Edición 108 abril-mayo 2004.

generados costa afuera para plantear los métodos más recomendables a usarse en trabajos exploratorios y de eventual desarrollo en el mar caribe colombiano.

El presente proyecto se compone como sigue: el capítulo 1 contiene generalidades del proceso de perforación; en el capítulo 2 se estudian los tipos de lodo usados en perforaciones costa afuera, se hace una descripción de cada uno y de sus beneficios y desventajas; en el capítulo 3 se describen los procesos de tratamiento aplicados a los desechos; en el capítulo 4 se estudian las opciones de disposición y los parámetros de evaluación que ayudan a seleccionarlas; en el capítulo 5 se presentan los aspectos generales de los sistemas de reglamentación internacionales, regionales y nacionales; el capítulo 6 presenta los criterios establecidos para la metodología de selección; en el capítulo 7 se muestran dos casos estudio para aplicar la metodología; finalmente se entregan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1 GENERALIDADES

Dada la necesidad de aumentar las reservas de petróleo en Colombia, en aras de lograr autosuficiencia energética, se han emprendido esfuerzos por encontrar hidrocarburos, con trabajos de exploración en aguas de la Costa Norte colombiana.

En las últimas cuatro décadas se ha desarrollado la tecnología necesaria para extraer hidrocarburos desde el fondo del mar, un logro que se ubica entre los más importantes para la humanidad. La búsqueda es difícil, costosa y a veces no se obtiene nada, pero es una situación crítica para el futuro de la economía de las naciones.

Encontrar una trampa de hidrocarburos en tierra y extraerlos es una tarea complicada. En costa afuera, en aguas profundas y condiciones climatológicas extremas se convierte en un verdadero reto. Las dos fases primarias de las operaciones de perforación que hacen parte del proceso de extracción de hidrocarburos, son la exploración y el desarrollo.

La perforación exploratoria involucra la ejecución de algunos pozos para determinar la presencia del recurso. Luego se perforan nuevos pozos para determinar las dimensiones del yacimiento. Estas determinan si el yacimiento se considera comercial para su posterior desarrollo, fase donde se perforan los pozos necesarios para producir adecuadamente

los hidrocarburos. Aunque las facilidades usadas para cada fase pueden ser diferentes, el proceso de perforación es similar.

Como parte del proceso de perforación, los cortes, que resultan de la acción de la broca sobre la formación, son llevados a superficie por el lodo. En esta etapa se separan, se transforman en desechos y el proceso de disposición comienza. En las plataformas de perforación los equipos de control de sólidos remueven los cortes para recuperar la mayor cantidad de lodo y reutilizarlo. Las opciones de disposición para los desechos sólidos comprenden la descarga, la reinyección y la disposición en tierra.

2 LODOS DE PERFORACIÓN

El lodo de perforación tiene entre otras funciones levantar los cortes hasta la superficie para su tratamiento y disposición, proporcionar el peso necesario para mantener la presión en el pozo, mantener estables las paredes del pozo y ayudar a enfriar y a lubricar la broca.

La principal preocupación relacionada con el uso de lodos de perforación en las plataformas marinas es la contaminación del océano debido a los aditivos químicos usados en su preparación y los cortes de perforación contaminados.

2.1 COMPONENTES BÁSICOS DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN

2.1.1 Agentes pesantes. Para llegar a la zona de interés los pozos se perforan a través de formaciones geopresurizadas. Dependiendo de la ubicación y la profundidad del pozo, se requiere que el lodo tenga una densidad de 9 a 12 lpg para controlar la presión subterránea y permitir una perforación segura. La barita finamente picada (sulfato de bario) es el componente pesado principal del lodo. Se adiciona para aumentar la gravedad específica y puede constituir hasta el 35% en volumen del lodo cuando se perforan formaciones altamente geopresurizadas. La barita es pesada, poco abrasiva e inerte; además, muchos estudios confirman su mínimo impacto al ambiente.

Minerales de hierro, especialmente hematita especular del Brasil, ha sido utilizada para sustituir la barita en algunos pozos. Aunque presenta mayor abrasión, se considera como una opción viable.¹

2.1.2 Viscosificadores. Los viscosificadores o agentes suspendidos evitan que los agentes pesantes se precipiten. La bentonita *Wyoming*, una arcilla sódica (montmorillonita), es la más utilizada. Constituye del 3 al 7% de la mayoría de los lodos de perforación. La bentonita tiene gran afinidad con el agua, puede hincharse y aumentar hasta 20 veces su tamaño en estado seco cuando es sumergida en agua fresca. La bentonita hidratada presenta excelentes características de suspensión y reduce la pérdida por filtrado desde el pozo.

En algunos casos, polímeros de alto peso molecular y solubles en agua han sustituido a las arcillas en los lodos de perforación. Resultan efectivos en concentraciones de 0.1 a 0.5 % del lodo. Un polímero especialmente popular y efectivo como agente viscosificante es la goma *xanthan*, producida por un cierto tipo de bacteria.¹

2.1.3 Adelgazantes. Los lodos de alta densidad requieren de adelgazantes o agentes dispersantes que actúen sobre los sólidos presentes. Sin ellos se dificulta la fluidez del lodo. Principalmente se utilizan polímeros aniónicos solubles o parcialmente solubles en agua, con un peso molecular menor a 50,000. Se utiliza el lignosulfonato de cromo, subproducto resultante del procesamiento con sulfitos de la pulpa de papel. Se utiliza en concentraciones que van del 0.5% al 2.0% del lodo. El cromo ayuda a mantener la estabilidad de la temperatura

del lignosulfonato. Su uso se discontinuó debido a su alta toxicidad y se reemplazo por otros metales menos tóxicos como el hierro.¹

2.1.4 Controladores de pérdida de filtrado. La presión hidrostática ejercida por la columna de lodo empuja al fluido hacia el interior de la formación permeable. De esta manera, se forma la torta de filtrado en las paredes del pozo. Si esto no se controla, la torta puede llegar a cerrar el pozo. Algunos aditivos ayudan a minimizar el filtrado y controlar la formación de la torta. Los más utilizados son la carboximetilcelulosa y almidones en concentraciones del 0.5% al 2.0%.¹

2.1.5 Químicos comerciales. Productos químicos inorgánicos como soda cáustica, cal, cloruro de potasio y yeso, son utilizados en lodos de perforación. La soda cáustica se utiliza para aumentar la alcalinidad del lodo. La alcalinidad reduce la corrosión e incrementa la solubilidad de los lignosulfatos y otros aditivos. Un pH normal para lodos de perforación está entre 9.0 y 11.5.¹

2.1.6 Polímeros sintéticos solubles en agua. Un amplio rango de polímeros puede ser sintetizado a través de la copolimerización del ácido acrílico y monómeros de acrilamida. Estos productos funcionan como viscosificadores, controladores de pérdida de filtrado, y en algunos casos, como adelgazantes.¹

2.2 TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN

La caracterización de los lodos de perforación se hace teniendo en cuenta la base con que estén preparados. En costa afuera se utilizan

principalmente tres tipos de lodos de perforación: Lodos Base Agua, Lodos Base Aceite y Lodos Base Sintética.

2.2.1 Lodos Base Agua (WBM*). La mayoría de los pozos costa afuera se perforan utilizando lodos base agua. Los WBM son mezclas acuosas de barita, arcilla y sólidos de formación que además contienen bajas concentraciones de polímeros, lignitos, lignosulfonatos y soda cáustica. También pueden contener en bajas concentraciones, otros materiales usados para resolver problemas específicos, por ejemplo antiespumantes. Los lodos de agua fresca contienen principalmente bentonita y soda cáustica, mientras que los lodos de agua salada contienen atapulgita. Los lodos base agua son los que presentan menor riesgo de contaminación y menor costo debido a que su principal componente es agua, ya sea fresca o del mar.

Un problema importante al trabajar con lodos base agua es la degradación de sus componentes químicos al perforar pozos de alta temperatura. Esta degradación puede variar las características reológicas y de filtrado del lodo incrementando los costos de operación. Los aditivos se seleccionan por su potencial para operar bajo las condiciones requeridas para cada caso. Algunos de ellos son: bentonita, viscosificadores poliméricos, reductores de pérdida de fluido.²

Cuando se perfora en formaciones poco profundas se utiliza el agua de mar como fluido de perforación ayudado de unas píldoras viscosificadoras de salmuera polimerizada para asegurar la efectiva limpieza del hueco.³

* Por comodidad visual se utilizan las siglas de su nombre en inglés: Water Based Mud.

Para que los lodos base agua sean la mejor opción a utilizar en perforaciones costa afuera deben ser mejorados y ofrecer:

- Buena compatibilidad ambiental. El lodo mejorado debe estar dentro de los rangos que la legislación ambiental requiera.
- Costos. La limpieza, las alternativas de disposición y el alto precio del fluido base, hacen que el costo de los lodos base aceite y sintéticos crezca. La opción es un lodo base agua barato que reduzca los costos de disposición y tratamiento de sólidos.
- Competencia técnica. Para que el costo-beneficio sea efectivo, el lodo debe dar un rendimiento en la perforación (Ej. tasa de penetración, tasa de dilución) similar a los otros tipos de lodo.

Estas consideraciones han guiado el desarrollo de un lodo base agua con silicatos. Los lodos con silicatos son esencialmente fluidos poliméricos con bajo contenido de sólidos. Su base puede ser agua fresca, agua de mar o una salmuera de NaCl o KCl incorporando un silicato soluble, tal como silicato de sodio y potasio o de potasio puro. Este tipo de lodo presenta una mejora en la estabilidad del pozo comparado con el lodo base agua.⁴

2.2.2 Lodos Base Aceite (OBM^{*}). En este lodo la fase continua es el aceite y la fase dispersa es el agua. Los OBM son más costosos y más tóxicos que los WBM y los fluidos y cortes de desecho no deben ser arrojados al mar. El aceite presente en los cortes se separa y se recicla.

* Por comodidad visual se utilizan las siglas de su nombre en inglés: Oil Based Mud.

El diesel y el aceite mineral son los componentes principales de este tipo de lodo.

Los lodos base diesel contienen un alto número de contaminantes convencionales y no convencionales incluyendo naftaleno, fenol, zinc, plomo, cromo y cobre. El aceite diesel contiene hidrocarburos aromáticos entre el 20 y 60% por volumen. Otros contaminantes no convencionales presentes en el diesel son el metilnaftaleno y el metilfenantreno. Los aceites minerales convencionales, a diferencia del diesel, tienen menos concentración de aromáticos y otros contaminantes. La concentración de metales en los lodos base aceite que proviene de la barita, es similar al contenido de metales en los lodos base agua.⁵

Los lodos base aceite se han usado exitosamente en la perforación de secciones de arcilla reactiva, pozos con alto ángulo de desviación, pozos con alta temperatura y presión. Esto se debe a que los fluidos de perforación base aceite son térmicamente estables, inhibidores de arcilla, con alta tolerancia a los contaminantes, no corrosivos, inherentemente lubricantes y de un costo moderado. Como consecuencia, este tipo de lodo es muy utilizado en las operaciones costa afuera alrededor del mundo.

Sin embargo, el problema del impacto ambiental es de gran preocupación. El uso de lodos base diesel está prohibido en el Mar del Norte y raramente se usa en otras partes del mundo. También esta prohibida la descarga del fluido base aceite que se obtiene con un aceite mineral de baja toxicidad. El problema más significativo es la disposición

de los cortes de perforación contaminados con residuos de aceite, los cuales se descargan en el ambiente marino causando daños a la flora y fauna.⁶

2.2.3 Lodos Base Sintética (SBM*). En lodos base sintética el líquido sintético forma la fase continua mientras una salmuera forma la fase dispersa. Durante las operaciones de perforación, los sólidos en el sistema de lodo son agregados a la fase continua. Así como en OBM, los cortes de perforación se dispersan menos en el lodo y el sistema no necesita grandes volúmenes de dilución para el control de sólidos.

Los sistemas de lodos base sintética se clasifican de acuerdo a la estructura molecular de su componente sintético; por ejemplo: ésteres, éteres, olefinas y parafinas. Los ésteres se obtienen a partir de la condensación de alcoholes y ácidos orgánicos bajo condiciones de catálisis ácida. Los ácidos orgánicos utilizados para obtener ésteres provienen de aceites vegetales.

Otros químicos se agregan a la base sintética para mantener las condiciones de perforación. Estos aditivos incluyen químicos para controlar la densidad, la lubricidad, la fluidez, la corrosión y las depositaciones. La barita es un componente de la mayoría de los sistemas sintéticos, como consecuencia el contenido de metales es similar al de los sistemas base agua. Los SBM contienen una cantidad poco importante de contaminantes y no contiene hidrocarburos aromáticos lo que reduce el impacto al medio ambiente y a la salud humana.⁵

* Por comodidad visual se utilizan las siglas de su nombre en inglés: Synthetic Based Mud.

Los SBM son usados donde los OBM son comúnmente requeridos para atender situaciones como alta temperatura en fondo, arcillas hidratables, formaciones de sal; en donde los WBM tienen desempeño limitado.

Aunque los costos iniciales de estos lodos generalmente exceden a los de OBM, esta desventaja se ve superada si los cortes de perforación de los pozos perforados pueden descargarse in situ, ahorrando los costos de transporte y disposición. Estos lodos presentan uso satisfactorio en pozos de alto ángulo direccional, horizontal y en pozos multilaterales comúnmente perforados en el Mar del Norte, Golfo de México y en otros lugares del mundo.

Los SBM han reducido los tiempos de completamiento de pozos, mejorando las ratas de penetración y reducido el tiempo de parada en situaciones de pega de tubería. En general estos lodos resuelven la mayoría de los problemas asociados a los OBM y también poseen algunas de las ventajas de los WBM, por ejemplo, baja toxicidad y aceptabilidad ambiental; pero a diferencia de la mayoría de éstos, son fácilmente reutilizables, reduciendo las descargas de desechos al fondo marino.⁷

A pesar de las bondades que este tipo de lodo presenta sobre los convencionales, resulta ser más costosos; por eso, el problema de la pérdida de lodo hacia las formaciones se hace más significativo. Por otro lado, la descarga de los desechos generados por éstos, es a pesar de todo de vital preocupación, comparada con las descargas de los de base agua.⁸

3 PROCESOS DE TRATAMIENTO APLICADOS A LOS DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS COSTA AFUERA

Perforar para producir aceite y gas involucra la descarga al mar de muchos residuos. Algunos de estos son: lodos de perforación y cortes que pueden contener hidrocarburos y químicos activos; aguas de producción con diversos grados de salinidad que pueden contener hidrocarburos y productos residuales de tratamiento. Además, ocurren descargas accidentales (principalmente de hidrocarburos) que generan graves consecuencias tanto para el medio ambiente como para la industria.

Las descargas que no son accidentales están controladas y sujetas a las disposiciones y obligaciones de los entes gubernamentales o convenciones internacionales.

Particularmente en los países del Mar del Norte, las tendencias actuales para evaluar las descargas caracterizan física y químicamente las sustancias, describen los procesos involucrados en su difusión y dilución en el medio, prueban la toxicidad, evalúan la acumulación de residuos y miden la degradación.⁹

Las operaciones de tratamiento y disposición son puntos claves en el diseño del manejo integral de desechos de perforación que se generan en costa afuera, manejo que a su vez, hace parte de un apropiado

diseño del plan de perforación de pozos, tanto exploratorios como de desarrollo, en el mar.

3.1 PROCEDENCIA DE LOS DESECHOS DE PERFORACIÓN

3.1.1 Cortes de Perforación. Los cortes de perforación son producidos continuamente en el fondo del hueco a una tasa proporcional al avance de la broca. Esos cortes son llevados a superficie por el lodo de perforación, donde son separados por el sistema de control de sólidos. Varios tamaños de cortes son separados por los equipos y se hace necesario remover tanto los de tamaño grande como los pequeños para mantener las propiedades de flujo requeridas.

El rango de tamaños de los cortes de perforación va desde grandes piezas del orden de centímetros a pequeñas partículas del orden de fracciones de milímetros conocidos como finos.

Como el lodo retorna del pozo cargado de cortes, este normalmente pasa primero por zarandas vibratorias primarias, que remueven los cortes más grandes del lodo de aproximadamente 1 a 5 milímetros. El lodo puede pasar por zarandas secundarias para remover cortes más pequeños. Finalmente, una porción o todo el lodo saliente de las zarandas primarias y secundarias se hace pasar a través de una centrífuga (conocida como centrífuga decantadora) o a otros dispositivos (hidrociclones), poseedores de un cernidor de malla más fina (desarenadores, desarcilladores o mud cleaners) y que pueden estos (centrífugas e hidrociclones) funcionar como unidades de remoción de

finos. Es importante remover los finos para mantener la reología deseada del sistema de lodo activo.

Así, la corriente de cortes de perforación esta compuesta típicamente de grandes cortes provenientes de las zarandas primarias, partículas finas provenientes de centrífugas o hidrociclones, y también pequeños cortes provenientes de zarandas secundarias. Asimismo, los cortes que dejan las zarandas primarias pueden ser adicionalmente tratados por otros dispositivos, conocidos como secadores de cortes.

Los cortes son descargados continuamente durante la perforación cuando se separan del lodo en el sistema de control de sólidos. Los cortes también llevan una cantidad residual de fluido adherido. Los sólidos totales suspendidos (TSS), conforman el grueso de la carga contaminante, y están compuestos por los mismos cortes de perforación y por el lodo adherido a los sólidos. Los cortes son primordialmente pequeñas cantidades de rocas, arcillas, esquistos y arenas. La presencia de sólidos en el lodo de perforación se debe primordialmente a la barita adicionada como agente pesante y a las arcillas que son adicionadas para modificar la viscosidad.

Debido a que la cantidad de TSS es muy grande y consta principalmente de grandes partículas que se asientan rápidamente en el lecho marino, la descarga de cortes asociados a SBM y sobretodo a OBM puede causar asfixia y/o alteración en el tamaño de grano de los sedimentos marinos dando por resultado un daño potencial a poblaciones de invertebrados, alteraciones potenciales en el lecho marino y en hábitat alimenticios.¹⁰

3.1.2 Lodos de Perforación. Los lodos de base sintética (SBM) son considerados productos valiosos y no desechos. Es práctica de la industria reutilizar continuamente los SBM mientras se perfora un intervalo del pozo. Al finalizar la perforación, el SBM remanente es transportado de vuelta a tierra para su readecuación y reutilización. El SBM es descargado solo como contaminante de la corriente de cortes de perforación. No se descargan como una corriente de desecho de lodo limpia (lodo no asociado con cortes), a diferencia de las descargas de lodos base agua (WBM).

Comparados con los WBM, los SBM y OBM son relativamente fáciles de separar de los cortes porque los sólidos no se dispersan en estos en la misma magnitud como en los WBM. Debido a la dispersión de finos en los WBM, los componentes iniciales del lodo son requeridos para mantener las propiedades de flujo necesarias. Esas adiciones exceden frecuentemente la capacidad del sistema de lodo. El volumen de dilución en exceso de un WBM es descargado como desecho resultante. La generación de este volumen de dilución de desecho no ocurre con SBM.

Las primeras secciones del pozo son perforadas normalmente con WBM. Cuando el pozo se hace más profundo, se incrementa el desempeño requerido del lodo, y el operador puede, en algún punto, decidir que el sistema de lodo debe ser cambiado ya sea a un tradicional OBM, o a un SBM. El sistema que incluye corriente de lodo y equipo de separación de sólidos, debe ser cambiado totalmente de WBM a SBM u OBM, aclarando que estos últimos no funcionan como un sistema combinado o mezclado. El sistema entero puede ser lodo base agua disperso como un WBM, o un lodo base agua no disperso tal como un OBM o SBM. La decisión de

cambiar el sistema de uno a otro depende de muchos factores que incluyen¹⁰:

- Consideraciones operacionales, esto es, tipo de unidad de perforación (riesgo de desconexión del *riser* con la unidad perforadora flotante), equipo de perforación, distancia de las facilidades de suministro.

- El relativo desempeño de un tipo de lodo comparado con otro, por ejemplo, la rata de penetración, ángulo de desviación de pozo, opciones de programas de tamaño de *casing*, desviación horizontal.

- Presencia de condiciones geológicas que favorecen un tipo particular o características de desempeño, por ejemplo, estabilidad / sensibilidad de formación, presión de poro o de formación vs. gradiente de fractura, potencial formación de hidratos de gas.

- Costos:
 - Del Lodo.
 - Diario de la operación del taladro de perforación.
 - Soporte logístico.

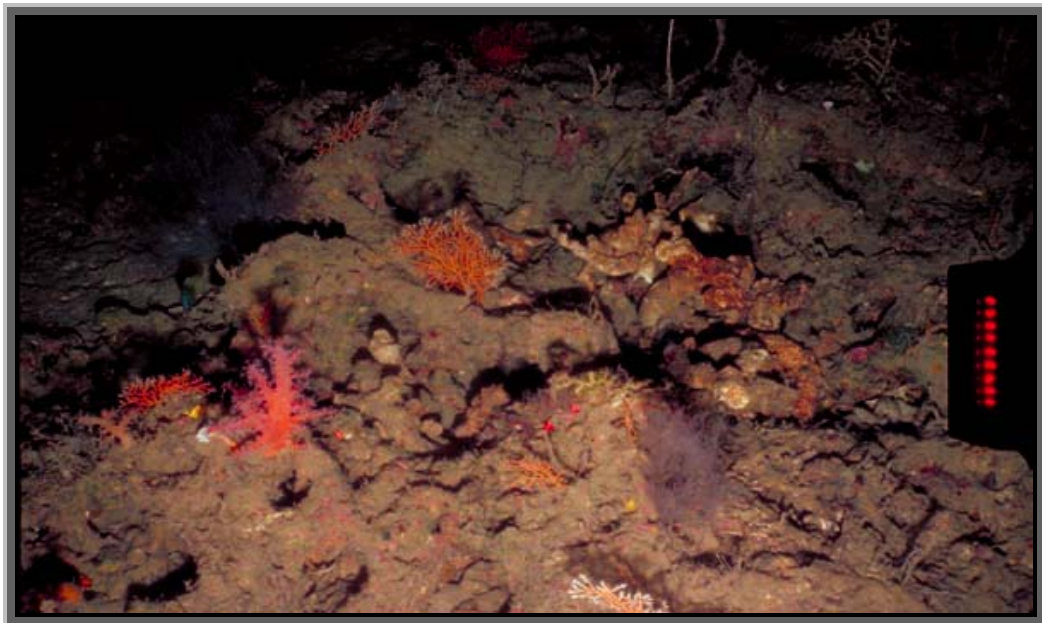
Frecuentemente en operaciones en aguas profundas la combinación correcta de factores indica el uso de SBM y OBM, esto se debe a que son operaciones de alto riesgo y por eso pueden justificar mejor el alto costo inicial del uso de esos lodos.

El recobro de SBM o de OBM de los cortes de perforación sirve para dos propósitos. El primero es disponer del fluido de perforación para su reintroducción al sistema de lodo activo, y el segundo es minimizar la descarga de SBM o disposición del OBM. Cuantos más métodos agresivos sean usados para recobrar lodo de cortes, estos tienden a deshacerse en partículas más pequeñas. Los finos no solo son más difíciles de separar del lodo, también causan un deterioro en ciertas propiedades, por ejemplo reológicas, de los lodos. Incrementar el recobro de lodo de cortes es un problema mayor para WBM que para SBM y OBM porque los primeros propician mejor la dispersión de los cortes, degradando así la reología del lodo WBM más que a la de los SBM y OBM. Comparados con los WBM, los más agresivos métodos de recobro de SBM de la corriente de desechos-cortes resultan muy prácticos y deseables debido al alto costo de los SBM. Esos métodos agresivos de recobro de lodo pueden también reducir efectivamente la descarga de SBM. Este tratamiento mejorado reduce el potencial de asfixia (carencia de oxígeno) en el sedimento receptor así como la cantidad de tóxicos y componentes no convencionales de SBM descargados. El nivel de reducción de SBM en descarga de cortes requerido en este lineamiento refleja usos apropiados de tecnologías BAT (mejor tecnología disponible).

Se pueden causar impactos ambientales por contaminantes tóxicos, convencionales y no convencionales presentes en el SBM que se adhieren a los cortes de perforación descargados. El SBM adherido está principalmente compuesto, en base volumétrica, de material sintético, o más concisamente, de material oleaginoso (como aceite). Este material oleaginoso puede causar hipoxia (reducción de oxígeno) o anoxia en

sedimentos cercanos, dependiendo de las corrientes, temperatura, y de la tasa de biodegradación. Los materiales oleaginosos que se biodegradan rápidamente agotarán el oxígeno primero que los materiales que se degradan más lentamente. La EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), sin embargo, considera que la biodegradación más rápida (especialmente anaeróbica) es ambientalmente preferible a la biodegradación más lenta a pesar del riesgo aumentado por el pequeño tiempo asociado a la anoxia de la biodegradación rápida. Esto es porque las pilas de cortes generalmente promueven la actividad anaeróbica, especialmente en aguas profundas, y la recolonización del área impactada (Ver figura 1) por la descarga de cortes de SBM u OBM ha estado relacionada con la desaparición del fluido base en las pilas o directamente en el sedimento, y no con los efectos de anoxia de poco tiempo que puede resultar mientras el fluido base desaparece.

FIGURA 1. Vida marina creciendo en un sitio de descarga de cortes (SBM)



FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

En estudios en el Mar del Norte, los fluidos base que se biodegradan más rápido desaparecen más rápidamente, y la recolonización en esos sitios ha sido más efectiva. El material oleaginoso puede también ser tóxico o bioacumularse, y puede contener contaminantes primarios tales como hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH). Sin embargo, el fluido base de los SBM normalmente no contiene PAH.

La barita, un material pesante que es componente de los SBM, es también descargado adherido a los cortes. La barita es un mineral compuesto principalmente de sulfato de bario, y se conoce que posee trazas de contaminantes de varios metales tóxicos tales como mercurio, cadmio, arsénico, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc.¹⁰

3.2 PROCESOS DE TRATAMIENTO

Los cortes de perforación son llevados hasta la superficie por el lodo para ser procesados. Cuando se remueven los cortes de la corriente de lodo se convierten en desechos y el proceso de disposición comienza. En las plataformas, el equipo de control de sólidos remueve los cortes indeseados del lodo, con el fin de obtener el máximo recobro de fluido de perforación para su reutilización.

Se han dividido los métodos de tratamiento según el lugar donde se realicen. Se clasifican entonces los mecanismos y tratamientos efectuados en el sitio (costa afuera) y en continente (Tierra, costa, etc.) así:

3.2.1 Procesos costa afuera. En general, el único tipo de tratamiento realizado en el sitio a los desechos de perforación generados es el control de sólidos; que conlleva a la descarga de los mismos al mar o a su disposición por cualquiera de los otros mecanismos, dependiendo básicamente, de las regulaciones de descarga que apliquen en el área perforada.

Se han reportado varios esfuerzos por desarrollar tecnologías que entreguen desechos adecuados para una descarga al mar: lavadores de cortes, incineradores y sistemas de extracción con solventes, pero resultan costosos para usarse o inseguros para aplicaciones costa afuera.

3.2.1.1 Control de sólidos. La función de un sistema de control de sólidos, independientemente del lodo en uso, es separar cortes del lodo de perforación para mantener la reología requerida del mismo. El lodo pierde calidad en la medida en que la cantidad de partículas finas aumente. El equipo de control de sólidos puede causar un incremento en la cantidad de finos en el lodo debido a fallas presentadas cuando los cortes más grandes pasan a través de zarandas vibratorias, centrífugas, y otros dispositivos de separación. Por consiguiente, el sistema de control de sólidos es diseñado y manejado para limitar la destrucción mecánica de los cortes maximizando la extracción de sólidos indeseables del lodo.¹⁰

El proceso de control no alcanza a retirar la totalidad de los sólidos presentes en el lodo. La cantidad removida dividida entre la cantidad generada representa la eficiencia del sistema. Los sólidos que

permanecen en el lodo se consideran contaminantes. Si el nivel de contaminación afecta sus propiedades debe ser descargado y reemplazado por un lodo limpio. Esta operación se conoce como descarga y dilución. Por otra parte, no todo el fluido de perforación se puede extraer de los sólidos. La cantidad de fluido removido con los cortes se conoce como factor de humedad. Se puede estimar el total de desechos de perforación provenientes de un pozo determinando la cantidad de cortes generados, la eficiencia de remoción, el factor de humedad y la tolerancia del fluido a la contaminación por sólidos.¹¹

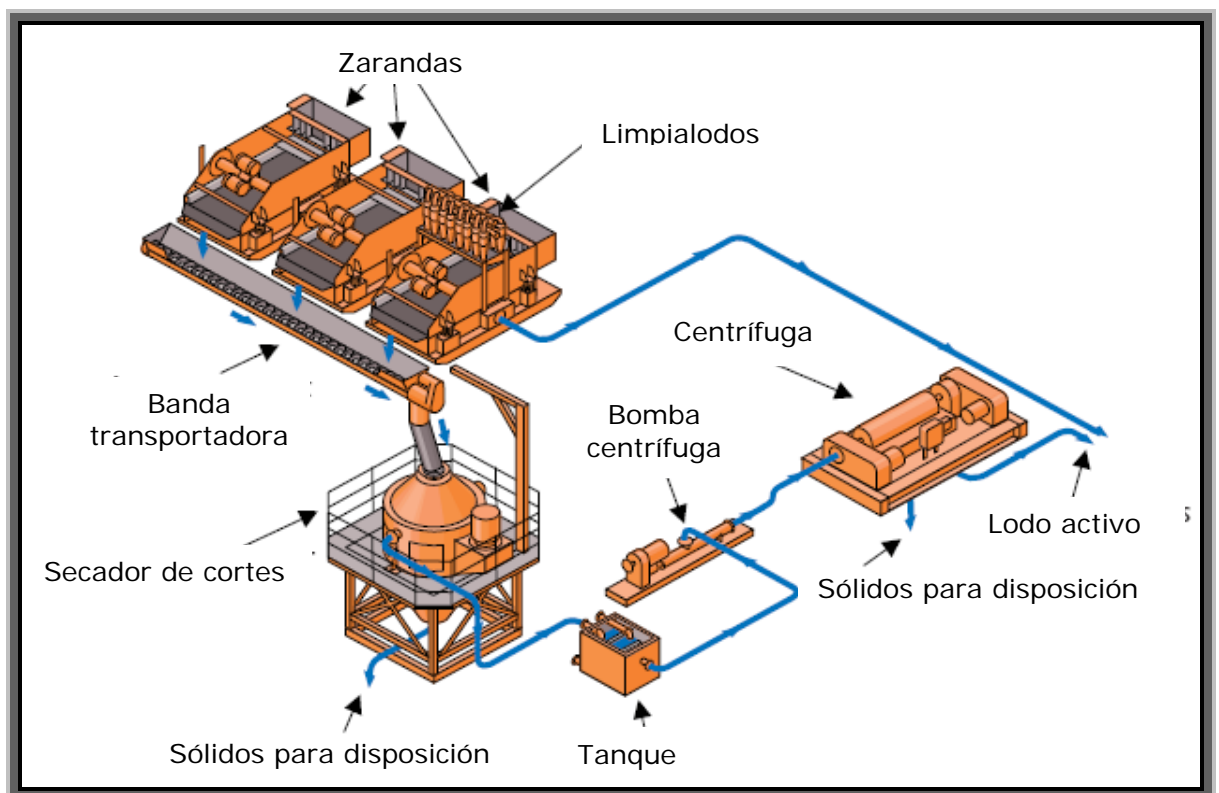
El tipo de lodo usado afecta la facilidad con la cual los sólidos de perforación pueden ser separados. Los cortes son generalmente más difíciles de remover en sistemas WBM que en SBM, por la tendencia de los sólidos para dispersarse en la fase agua de los WBM. El sistema para el control de sólidos por consiguiente, puede ser notablemente diferente para sistemas WBM en comparación con los sistemas OBM o SBM. Equipos adicionales como hidrociclones y las unidades químicas de floculación son algunas veces empleados para WBM. Tales pasos de separación resultan generalmente de más cuando se utilizan los SBM u OBM, y son a menudo evitados porque derivan en pérdidas adicionales de lodo en la descarga de corrientes de desechos sólidos. Según la EPA, no hay diferencia distinguible en la separación de cortes de OBM comparada con la de SBM.¹⁰

Un típico sistema de control de sólidos para SBM y OBM, como se muestra en la Figura 2, consiste en una adecuada combinación de equipos dependiendo de la naturaleza del programa de perforación: zarandas vibratorias primarias y secundarias que separan cortes de

lodo; una centrífuga para mayor recobro de lodo de la corriente de desechos; un dispositivo de "Alto G" o alta gravedad para remover finos sólidos de la corriente de lodo; y trampas de arena.

El lodo que retorna del pozo viene cargado de cortes. El rango de tamaño de cortes va de partículas grandes del orden de centímetros o más a pequeñas partículas (por eje. Finos o sólidos de baja gravedad) que tienen tamaño de fracciones de milímetros. Prácticas normales o estándares de sistemas de control de sólidos emplean zarandas vibratorias primarias y secundarias en serie con una "unidad de remoción de finos" (esto es, centrífuga decantadora o *mud cleaners*).

FIGURA 2. Sistema de control de sólidos para OBM y SBM.



FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

El lodo y los cortes del pozo pasan primero a través de zarandas primarias. Estas remueven los cortes más grandes los cuales tienen aproximadamente de 1 a 5 mm de tamaño. El lodo recuperado de estas zarandas pasa entonces a zarandas secundarias para remover cortes más pequeños. Finalmente, una porción o todo el lodo recuperado de las zarandas primarias y secundarias pueden pasar a través de unidades de remoción de finos.¹⁰

Los operadores que usan tecnologías de control de sólidos intercalan una unidad de tratamiento adicional en la secuencia descrita. Un sistema mejorado de control de sólidos procesa los cortes descargados de las zarandas primarias y secundarias a través de un "secador de cortes" ("*cuttings dryer*") por ejemplo centrífugas horizontales o verticales, unidades prensadoras de recobro de lodo, dispositivos de Alto G. Los cortes provenientes de un secador de cortes son descargados (en donde aplique) y el SBM o OBM recuperado enviado a las unidades de remoción de finos. La ventaja de estos secadores de cortes es que se recupera más SBM para reciclar y por ende menos cantidades son descargadas al océano. Esto reduce consecuentemente las cargas de contaminantes y el potencial de los desechos de causar anoxia en los sedimentos receptores.¹⁰

En resumen, el sistema de control de sólidos aplica secuencialmente diferentes tecnologías para remover sólidos de formación presentes en el fluido de perforación. El reto consiste en separar estos desechos sin perder los componentes valiosos del lodo. Entre los sistemas de separación más útiles y conocidos están: zarandas vibratorias, los hidrociclones, los desarenadores, los desarcilladores.

3.2.1.1.1 Zarandas vibratorias. Es el primer equipo y más utilizado en el control de sólidos (ver Figura 3), consiste en un sistema vibratorio rotacional que separa los sólidos del lodo a través de uno o varios tamices. Los tamices son de varios tamaños, pueden ser rectangulares o cuadrados. La mayoría de los tamices son de malla cuadrada y el tamaño de los huecos varía según las necesidades de separación. Si el conjunto de tamices escogido no funciona eficazmente con el caudal de lodo y se pierde demasiado fluido con los sólidos, es necesario cambiarlos para ajustarse a las circunstancias. Los tamices más conocidos son los de dos y tres mallas en paralelo o en serie y el de malla sencilla. Todo tamiz tiene una inclinación, el ángulo óptimo lo determina la cantidad de cortes tratados. Las mallas rotas o averiadas deben ser reemplazadas inmediatamente.¹²

FIGURA 3. Zaranda vibratoria



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

3.2.1.1.2 Hidrociclones. Funcionan con un principio de transformación mecánica. La presión aplicada al lodo por una bomba centrífuga se convierte dentro del cono en fuerza centrífuga que acelera la precipitación de las partículas. El lodo entra de manera tangencial y se desplaza a altas revoluciones formando un flujo en espiral dirigido hacia el orificio inferior del cono, en el trayecto los sólidos y líquidos más pesados se desplazan hacia las paredes y se deslizan hacia abajo para ser eliminados en una corriente inferior. Las partículas más livianas y el fluido restante se devuelven hacia arriba a través de un vórtice de succión que los regresa por la parte media del cono para descargarse en una corriente superior. El tamaño de grano separado depende del diámetro del cono y de la presión de la bomba alimentadora. Menores presiones dan por resultados una separación más gruesa y una capacidad reducida. La descarga inferior debe ser considerada para conseguir la operación más eficiente del aparato. La descarga debe ser una aspersion fina con una ligera succión en el centro. No es deseable una descarga en forma de "chorro" sin succión de aire. Sin embargo, cuando se perfora rápido, en un pozo de gran diámetro, la alimentación puede a menudo encontrarse sobrecargada, resultando en una descarga en chorro. Esta situación es tolerable, puesto que sería peor tener que desconectar la unidad y no tener ninguna clase de control de sólidos. Si un hidrociclón descarga en forma de chorro y la alimentación no está sobrecargada, el tamaño del vértice (ubicado en la descarga) puede ser ajustado para que dé una descarga de aspersion por medio de un ajustador. Si la presión de alimentación está dentro del rango correcto, y la descarga en forma de chorro no puede cambiarse a descarga de aspersion promedio de este ajuste, usualmente se trata de que la

capacidad de los conos es demasiado pequeña para el trabajo de remoción que se debe hacer.¹²

3.2.1.1.3 Desarenadores. Son conos generalmente de diámetro interno de 6 pulgadas, separan tamaños de grano grandes y son utilizados para descongestionar los desarcilladores. Tienen la ventaja de manipular volúmenes más grandes de lodo por cada cono, y la desventaja de seleccionar tamaños más grandes de partícula. Manejan grandes caudales.^{12,13}

3.2.1.1.4 Desarcilladores. Son conos de 4 pulgadas de diámetro. Pueden separar partículas entre 15 y 20 micrones en aspersion. La barita, que está en este rango de diámetros, precipita; por eso es necesario tener mucho cuidado al utilizarlos en sistemas de lodos densificados (mayor de 12,5 lb/gal.) pues pueden llegar a ser antieconómicos en la perforación.¹²

3.2.1.1.5 *Mud cleaner* o Limpialodos. Esta compuesto de una batería de conos desarcilladores (generalmente 8 conos de 4") colocados encima de una tamiz de malla fina y alta vibración. El proceso remueve los sólidos perforados de tamaño de arena aplicando primero el hidrociclón al lodo y haciendo caer luego la descarga sobre el tamiz vibratorio de malla fina. El lodo y los sólidos que atraviesan el tamiz son recuperados y los retenidos sobre el tamiz se descartan. Dado el tamaño de partícula de la barita, gran parte de ella será descargada por el aparato y luego atravesará el tamiz regresando al sistema. Un limpialodo es, en la práctica, un equipo que desarena lodos densificados.

El tamaño de malla de los tamices de los limpiadores varía entre 120 y 325. Si el limpiador ha de trabajar continuamente, un tamiz de malla 150 puede mantener el sistema de lodo limpio con eficiencia. Hay situaciones especiales, entre ellas el uso de un limpiador para un OBM o lodos con fase líquida de alto costo en donde se requiere el empleo de algunas mallas menores.

Para el limpiador, la recuperación de barita y el salvamento de fases líquidas costosas (petróleo, KCl) es lo ventajoso, además de que el material descartado del tamiz vibratorio es notablemente más seco. El menor volumen y la mayor sequedad del material de descarte reducen también el costo del proceso.¹³

3.2.1.1.6 Centrífugas. Son equipos que utilizan su propio sistema de rotación para imprimir una fuerza centrífuga que acelera la precipitación y separación de los sólidos que acompañan al lodo (ver Figura 4).

Las centrífugas de tipo decantación consisten en una cámara de acero cónica colocada de manera horizontal, que rota a alta velocidad, con un doble transportador de tornillo en su interior. Para que la centrífuga funcione eficientemente es necesario diluir el fluido de entrada en caso de que su viscosidad sea alta. Generalmente, cuanto más alta es la viscosidad del lodo original, mayor es la dilución necesaria (2 a 4 galones por minuto, frecuentemente). La viscosidad de la entrada debe ser de 35 a 37 seg/qt. Si está por encima, la eficiencia disminuye debido a la menor velocidad de sedimentación. Si la viscosidad es muy inferior a 35 seg/qt se está añadiendo agua en exceso, lo que causará turbulencia en la cámara reduciendo por lo tanto la eficiencia.

FIGURA 4. Centrifuga.



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

Debe prestársele mucha atención a las indicaciones de los fabricantes con respecto a las tasas de alimentación y a la velocidad de la cámara.

Los aumentos de viscosidad y de resistencia de gel son las mejores indicaciones de que debe emplearse una centrifuga en un sistema de lodo densificado. Sin embargo, si se reduce la cantidad de partículas finas hasta el punto de destruir la distribución apropiada del tamaño de partículas, se pueden causar problemas de control de filtrado y de pega diferencial. Por consiguiente, se deberá también agregar bentonita para reestablecer buenas propiedades formadoras de pared. Se deberán asimismo agregar agua y sustancias químicas en cantidades normales para mantener las propiedades deseables en el sistema de lodo. Deben añadirse aditivos químicos y fluido base (petróleo o sintéticos) para

mantener el ambiente químico original y el contenido de petróleos en el sistema.¹⁴

La función más importante de la centrífuga es recuperar la mayor parte del lodo, reduciendo el costo del lodo y sin sacrificar las propiedades del mismo; por esta razón es muy utilizable en lodos costosos como los base aceite y sintética; además, el sólido que se separa se encuentra seco excepto por el fluido que retiene por efecto de su mojabilidad. Los hidrociclones, por el contrario, pierden lodos en su corriente de desecho. Un sistema combinado desarcillador y centrífuga es muy eficaz, las labores de remoción se complementan ya que los primeros trabajan grandes caudales (flujo total de lodo) pero desperdician mucho lodo en la corriente de sólidos y la segunda trabaja caudales reducidos pero deja el sólido seco, recuperándose de esta manera la mayor cantidad de lodo posible.¹²

Otro tipo de centrífuga es la de "rotor perforado". Consiste de un tambor cilíndrico perforado con numerosos orificios de media pulgada, uniformemente distribuidos; este tambor rota en una posición horizontal dentro de una cámara cilíndrica estacionaria. La cámara tiene empaques en cada extremo para permitir el paso de los ejes del rotor. Si bien trabaja sobre la base de un principio similar, la centrífuga de rotor perforado ahorra en promedio menos material densificante que la centrífuga de decantación. La única ventaja que trae el uso de esta centrífuga es que es muy fácil de transportar y que puede colocarse en cualquier sitio accesible cerca del pozo.¹⁵

Se han desarrollado nuevos diseños de centrífugas. La centrífuga "*Mud 10*", desarrollada por un fabricante que provee a operadores del Mar del Norte, combina características de diseño tanto de una centrífuga como de zarandas. Posee un cono interno rotatorio que también vibra, logrando la segunda retención mínima reportada de lodo en cortes entre los dispositivos revisados por la EPA.

Los datos de la evaluación de la agencia EPA mostraron que la cantidad de lodo retenido en cortes siguiendo la tecnología de centrífuga Mud 10 es de 3,85%. El costo de alquiler del equipo incluyendo personal para operación es de US\$ 1.200 por día.

Sin embargo, además de la centrífuga Mud 10, cuyo cono rota alrededor de un eje horizontal, una centrífuga orientada verticalmente alcanza fuerzas G más altas, y los valores de retención más bajos reportados. La evaluación de datos suministrados para estudios de la EPA muestran, para esta tecnología, la cantidad de SBM retenida en cortes del 3,72%, el mejor valor reportado por la EPA.

Por la parte de compatibilidad de estos equipos, se estima que se requieren 150 ft² para la instalación de un sistema secador de cortes, con un mínimo espacio vertical libre de un típico sistema secador de 6 ft. Para un sistema secador vertical, se estima un área de 15 x 15 ft y de 11 ft de altura.¹⁰

3.2.1.1.7 Secadores de cortes. Prensa limpiadora. Estos equipos, como el mostrado en la figura 5, han sido usados para separar lodo adherido de la corriente de desechos de cortes, antes de una descarga.

El equipo opera generalmente apretando los cortes tal y como estén, extruyéndolos a través de la unidad, produciendo una corriente de lodo y una masa comprimida de cortes. El equipo crea pedazos de sólidos en forma de ladrillos, con lodo atrapado. Estos equipos no son muy usados por operadores de USA para el recobro de lodo de cortes. Esta tecnología revela un nivel de desempeño de 6,71% de SBM retenido en cortes, ubicándose entre la tecnología de las centrífugas horizontales (Mud 10) y verticales (3,71%-3,85% respectivamente) y zarandas primarias (9,32%)/centrífuga decantadora (9,97%), pero de mejor desempeño que la tecnología de zarandas secundarias (13,8%) y *mud cleaners* (11,9%).¹⁰

La figura 6 muestra el estado de los cortes luego de pasar por el secador de cortes.

FIGURA 5. Secador de cortes vertical



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

FIGURA 6. Cortes secos



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

3.2.1.2 Limpieza de cortes. Las dos técnicas más utilizadas para la limpieza de los cortes contaminados con aceite son:

- Dilución del aceite base seguido de un proceso de decantación centrífuga en dos etapas.
- Lavado con un surfactante acuoso en un proceso de tres etapas (agitación, decantación centrífuga, centrifugado con discos).

El fluido de limpieza a utilizar moja la superficie del corte impregnada de aceite y lo remueve. El aceite debe ser de menor densidad que el fluido para que flote en fase separada en la superficie y después decantarlo. El fluido de limpieza se recicla para futuras aplicaciones. Para evaluar la efectividad y potencial de reciclaje se realizan una serie de estudios y ensayos piloto a nivel de laboratorio.¹⁶

3.2.1.3 Almacenamiento y manejo de los cortes. Una vez los cortes hayan pasado por el sistema de control de sólidos, los sistemas de almacenaje y manejo toman la corriente de desechos que contiene los residuos aún impregnados con lodo y lo entregan a la siguiente etapa, el proceso de disposición. Si la opción es descargar, los requerimientos de manejo serán mínimos y no hará falta almacenaje.

Si no se descarga, se necesita un sistema de transporte de cortes (banda transportadora o sistema de vacío). Además, se debe contar con sitios de almacenaje (bolsas, cajas, tanques. Ver Figura 7) debido a las limitaciones presentadas por la tasa a la cual los cortes pueden ser aceptados en el siguiente paso del proceso. La capacidad de almacenamiento debe ser suficiente para manejar tasas variables de generación de cortes y retrasos asociados a la inyección o descarga. Si se excede la capacidad de almacenamiento, las operaciones de perforación deben ser detenidas. El espacio en la plataforma también es una limitante para la tasa de aceptación de la corriente de cortes entre etapas del proceso.¹⁵

FIGURA 7. Tanque de almacenamiento



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

3.2.2 Procesos en tierra. Se hace necesario transportar los cortes desde su origen hasta el sitio destinado para aplicar los procesos en tierra. Las operaciones de transporte de cortes incrementan los costos totales de perforación e incluyen un factor adicional de riesgo de impacto ambiental.

3.2.2.1 Tratamientos Térmicos. Hay una variedad de técnicas de tratamientos basadas en la aplicación de calor al material de desecho. Los productos finales de esas técnicas dependerán de la cantidad de calor empleado. Tratamientos de baja temperatura pueden permitir el recobro de hidrocarburos y agua de los desechos, al contrario del uso de tecnologías de alta temperatura que pueden destruir componentes orgánicos por combustión.¹³

Los factores decisivos para la aplicación de estas tecnologías incluyen entre otros: caracterización del tipo de desecho, regulaciones ambientales, disposición final de cenizas y costos.

3.2.2.1.1 Procesos de incineración. La incineración usa la combustión para convertir los desechos en materiales menos voluminosos. La incineración puede llevarse a cabo a través de prácticas de quema abierta de desechos en fosas, aunque el grado de combustión alcanzada será menor que el alcanzado en incineradores comerciales. Esto se debe a que los incineradores comerciales pueden controlar el tiempo de residencia, temperatura y turbulencia dentro de la cámara de incineración para optimizar la combustión. Estos incineradores están muchas veces equipados con aparatos de control a la contaminación del aire, que remueven productos incompletos de combustión, elimina la emisión de partículas y reducen la emisión de SO_x y NO_x . Hay muchos tipos de incineradores y muchos tipos de mecanismos de control de la contaminación del aire.

Los incineradores son generalmente usados para destruir desechos orgánicos que poseen altos niveles de riesgo a la salud humana y al ambiente. Como una regla, la incineración de la mayoría de los desechos de perforación no es necesaria. Sin embargo, si la operación está localizada en un área ambientalmente sensible y otras opciones de tratamiento no están disponibles, entonces la incineración puede ser la mejor manera de manejar los desechos de estas operaciones.

A causa de su durabilidad y de su habilidad para incinerar casi cualquier desecho, independientemente del tamaño y composición, el tipo de incinerador que mejor se aplica es el horno rotatorio.

La disposición de los sólidos que quedan de la incineración debe ser manejada adecuadamente. Cuando los componentes orgánicos son incinerados, la concentración de metales en el desecho remanente se incrementará. El operador debería asegurar que las cenizas o residuos de incineración resultantes del tratamiento de estos desechos sean manejados y dispuestos adecuadamente. Puede ser requerido un método de estabilización para prevenir la emisión o liberación de peligrosas sustancias al ambiente.¹³

3.2.2.1.1.1 Horno rotatorio. Es un tubo inclinado de gran longitud y rotación lenta (Figura 8). Los desechos y combustibles se introducen en la parte alta del horno, a medida que avanzan a través de éste son agitados suavemente por el movimiento rotacional, mejorando la eficiencia del mezclado y la combustión de los residuos. Los gases de combustión generados pasan por una cámara secundaria de oxidación para la eficiencia de la combustión, el residuo de cenizas se colecta en la parte baja del horno y su disposición final depende de las regulaciones ambientales para este tipo de sólido.¹²

FIGURA 8. Horno rotatorio



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

3.2.2.1.1.2 Lecho fluidizado. Los incineradores de lecho fluidizado incorporan lechos de material granular inerte (usualmente arena) para mejorar la transferencia de calor al desecho. Se introduce aire de combustión para fluidizar y mantener el lecho en suspensión, incrementando el contacto, mezcla y transferencia de calor al residuo.¹²

3.2.2.1.2 Pirolisis. El tratamiento térmico anaeróbico o pirolisis, se considera como sistema que aplica los procesos de incineración y de extracción con vapor. El tratamiento primario es similar a las unidades de despojo térmico operando a temperatura por encima de los 450° F, a fin de remover agua e hidrocarburo livianos. Existe una zona anaeróbica de reacción a temperaturas del orden de 1.100° F, para la volatilización de los contaminantes de alto peso molecular. La ausencia de oxígeno previene la combustión de contaminantes evitando la formación de compuestos químicos indeseables como dioxinas y furanos, permitiendo

la recuperación de éstos en unidades de condensación. Los sólidos residuales son incinerados en cámaras aeróbicas de combustión.¹²

3.2.2.1.3 Sistemas de desabsorción térmica. En un sistema de desabsorción térmica, como el de la Figura 9, se realiza un proceso de no oxidación que usa calor para absorber aceites de los desechos. La mayoría de los sistemas térmicos queman combustible para proveer calor y volatilizar el aceite, pero hay unos sistemas que usan energía eléctrica o electromagnética para calentar.

FIGURA 9. Sistema de desabsorción térmica



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

Los sistemas de desabsorción son generalmente de dos tipos: sistemas de baja temperatura y sistemas de alta temperatura. La temperatura de operación del sistema de baja temperatura es usualmente de 250° a 350° C, mientras los de alta pueden llegar a emplear temperaturas por encima de 520° C. Los sistemas de baja temperatura pueden ser

suficientes para tratar desechos con hidrocarburos livianos. Los sistemas de altas temperaturas pueden ser capaces de alcanzar bajos contenidos finales de hidrocarburos pesados en los desechos.

La corriente de desechos del sistema producirá varias corrientes secundarias de desechos: sólidos, agua condensada, hidrocarburos condensados y posiblemente una corriente de aire del condensador. Cada una de esas corrientes pueden requerir análisis para determinar sus características y escoger la mejor opción para reciclarlos y/o disponerlos.¹²

3.2.2.1.4 Infrarrojo. Emplea como fuente de calor la energía de las ondas electromagnéticas de los rayos infrarrojos. La energía infrarroja es proporcionada por elementos a base de carburo de silicio. El material es transportado a través de un horno donde se somete a pirolisis. Los gases de salida son tratados en cámaras de combustión.¹²

3.2.2.2 Tratamiento químico y físicos.

3.2.2.2.1 Solidificación, estabilización y encapsulación. En general, con estos procesos se obtienen sólidos secos (ya sea como monolitos o como un sólido granular seco). Los desechos mediante esta tecnología son almacenados y no destruidos. Sin embargo, las concentraciones de los constituyentes asociados al desecho tratado pueden ser diferentes a las del material original.

Procesos llevados a cabo con mezclas de ceniza, cal, cemento Pórtland u otros agentes estabilizantes han sido aplicados en la industria para

solidificar y/o estabilizar desechos. Esos procesos son especialmente efectivos para estabilizar metales. Por otra parte, altas concentraciones de componentes orgánicos, sales y bentonita han mostrado interferir con la intención del proceso, y por eso se limita la aplicación de esta técnica.¹³

3.2.2.2.2 Micro-encapsulación con sílice. La micro-encapsulación con sílice es un proceso por el cual el fluido hidrocarburo (aceite, sintético) unido a los cortes es físicamente encapsulado en una matriz insoluble de silicatos amorfos. El hidrocarburo encapsulado no se lixivia ni se biodegrada. El proceso como tal es un proceso químico basado en una reacción del tipo ácido base. El proceso consiste de dos etapas:¹⁷

- La adición al desecho contaminado con hidrocarburo de un agente emulsificante, en un ambiente ácido, el cual emulsifica el aceite en gotas microscópicas.

- La adición del silicato soluble en agua, el cual reacciona con el emulsificante acidificado. En esta reacción, se forma sílica gel alrededor de las gotas de hidrocarburo emulsificadas.

El resultado final es un precipitado estable, de silicato amorfo (SiO_2) encapsulando las micro-gotas de hidrocarburos. El rango de tamaños de las cápsulas está entre 1 y 300 micrones. Este método elimina el impacto ambiental de la descarga de cortes al mar previniendo:

- Asfixia del lecho marino porque los cortes se humectan con agua y se dispersan en la columna de agua.

- Impacto potencial por toxicidad ya que el fluido se comporta en forma inerte.
- El enriquecimiento orgánico porque la microencapsulación previene el contacto con los microorganismos y por eso el hidrocarburo no se biodegrada. Sí estos no se biodegradan no hay demanda de oxígeno que pueda generar la situación de enriquecimiento orgánico.

3.2.2.2.3 Extracción con solvente La extracción usa solventes para remover hidrocarburos de sólidos contaminados. Los solventes usados para la extracción incluyen dióxido de carbono, propano, hexano, trietilamina, cloruro de metileno. Elaborar un sistema de recobro con este mecanismo se emplea generalmente para reutilizar el solvente.

Un sistema de extracción con solvente adecuadamente operado recobrará y reciclará, en apariencia, todo el solvente usado para la extracción y al hidrocarburo. Un sistema cerrado para la fase vapor debería asegurar que no habrá emisiones directas al aire. Debe tenerse en cuenta la seguridad del personal para sistemas que usen altas temperaturas, altas presiones o solventes volátiles.

La disposición del agua de desecho separada de los sólidos y el tratamiento de los sólidos, dependerá de los constituyentes de las corrientes tratadas. El agua extraída puede ser inyectada o requerir tratamiento antes de una descarga. Los sólidos tratados pueden ser calentados para remover solvente residual antes de la disposición. Los

sólidos con contenido significativo de metales pueden ser estabilizados para prevenir la migración después de la disposición.¹³

3.2.2.3 Biotratamientos. Muchos compuestos orgánicos presentes en los desechos de perforación pueden ser degradados a bióxido de carbono y agua usando procesos biológicos naturales.

3.2.2.3.1 Rellenos (*Landfarming*). Este procedimiento consiste en depositar, controlada y repetidamente, los desechos sobre la superficie de un suelo dependiendo de los componentes hidrocarburos que tengan para su degradación por medio de microorganismos que estén presentes, en forma natural, en el área seleccionada (Ver Figura 10). El suelo es constantemente removido para proveer la mezcla necesaria de oxígeno y permitir su adecuada transferencia.

Las consideraciones para la aplicación de esta técnica incluyen la topografía e hidrología del terreno y la composición física y química de los desechos.¹³

FIGURA 10. Relleno



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

3.2.2.3.2 *Landspreading.* El proceso es muy similar al *landfarming*, la diferencia radica en que la depositación de los desechos se hace en una sola aplicación. Es una técnica apropiada para reducir el contenido de material orgánico en los desechos. La concentración de hidrocarburos es registrada a medida que avanza el proceso para evaluar su desempeño.

Es muy efectiva para la disposición de fluidos de perforación y cortes con bajos niveles de hidrocarburos y sal.¹³

3.2.2.3.3 Compostaje. Los desechos se mezclan con algunos agentes que pueden ser astillas de madera, cáscara de arroz u otros agentes naturales para aumentar la porosidad y el potencial de aireación. Entre el 40 y el 60% de peso en la mezcla de compostaje es agua para proveer óptimas condiciones de biodegradación. En la Figura 11 se muestra un terreno adecuado por Chevron Texaco para compostaje.

La degradación de compuestos orgánicos usando técnicas de compostaje resulta más efectiva que las técnicas anteriores. Además, los desechos tratados pueden ser monitoreados fácilmente para controlar sus propiedades.¹³

FIGURA 11. Tratamiento de desechos por compostaje.



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

4 DISPOSICIÓN DE DESECHOS DE PERFORACIÓN GENERADOS COSTA AFUERA

El estudio de las opciones de disposición de los desechos producidos por la perforación de pozos costa afuera es una tarea fundamental en el diseño de las operaciones de perforación. Partiendo de este se puede seleccionar la opción más apropiada para cada caso específico.

Las opciones disponibles para la disposición de cortes originados por la perforación son descarga, reinyección y disposición en tierra.

4.1 DESCARGA

La descarga es la opción más utilizada alrededor del mundo. Sin embargo, su uso se limita dependiendo de las características del fluido que se descarga, y, de los compuestos químicos remanentes en los cortes de perforación después del proceso de control de sólidos. Por esta razón, para evaluar la posible descarga se deben considerar, entre otros factores, las regulaciones que rigen el área de influencia.

La descarga de los desechos costa afuera es operacionalmente simple y no requiere de equipo adicional al normalmente encontrado en una plataforma. La opción consiste en descargar los cortes, después de ser tratados, en el ambiente local. Específicamente, una vez se han removido los fluidos de perforación de los cortes por el equipo de control de sólidos, se mezclan con agua de mar y se descargan por un tubo de

descenso. El extremo final del tubo se encuentra a pocos metros por debajo de la superficie del agua. A diferencia de otras alternativas, no se necesita el almacenamiento temporal de los cortes.

Los cortes descargados y los fluidos absorbidos se depositan en el suelo marino y se acumulan en diferentes grados. La acumulación depende del volumen y características del fluido descargado y las condiciones del ambiente que los recibe. Como consecuencia, inmediatamente después de la descarga, la concentración de fluidos no acuosos aumentará afectando la vida marina. Con el tiempo, la concentración de los fluidos disminuye y los organismos se recuperan. Pero este tiempo depende del tipo de fluidos, del espesor de la acumulación y las características del medio receptor (por ejemplo profundidad del agua, temperatura, oleaje y corrientes). El impacto a la columna de agua se considera despreciable gracias al rápido asentamiento de los cortes y a la baja solubilidad de los fluidos.

En la mayoría de las operaciones costa afuera alrededor del mundo, la descarga de WBF y los cortes asociados es una práctica rutinaria, excepto en áreas altamente sensibles. Los cortes resultantes de fluidos no acuosos (OBM Y SBM) pueden descargarse en ciertas áreas de acuerdo a las regulaciones locales.¹⁵

Las ventajas y desventajas de la descarga de desechos, en cuanto a aspectos económicos, operacionales y ambientales, se presentan en la Tabla 1.

4.1.1 Descarga de lodos base agua. Desde el punto de vista ambiental y económico, los lodos base agua son la mejor opción para perforar. Su formulación incluye algunos aditivos que pueden ser degradados directamente por los organismos. Se debe tener especial cuidado con el uso de aditivos persistentes, tóxicos y que generen acumulación.¹⁸

La descarga de lodos base agua y cortes asociados no ocasiona efectos a largo plazo o impactos por propagación al suelo marino debido a la velocidad de degradación de sus componentes.¹⁹

Se puede realizar de dos maneras²⁰:

- Descarga continua de lodo adherido a los cortes de perforación. La tasa de descarga es generalmente baja y el material alcanza a dispersarse y diluirse casi inmediatamente. Descarga continua es de hecho un nombre inapropiado debido a que tiende a ser intermitente, pero así se conoce.

- Descarga por baches. Se realiza en operaciones de perforación donde las condiciones geológicas obliguen a diluir el lodo; generalmente cuando hay alto contenido de finos. Una parte del lodo se descarga y la restante se diluye para adecuar el sistema. Se utiliza además, al terminar de perforar una sección y la siguiente requiere de un lodo fresco o de otras características. Este tipo de descarga también se hace al final del pozo cuando se terminan las operaciones y el equipo es transportado a otra ubicación. El volumen y la tasa de descarga son más altos que en la continua.

TABLA 1. Ventajas y desventajas de la descarga.

Económico	Operacional	Ambiental
<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Muy bajo costo por unidad de volumen tratado ▪ No existe la obligación potencial de utilizar facilidades de tratamiento en tierra. <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Costos de análisis de la descarga e impacto potencial ▪ Posibilidad de impactos ambientales a futuro por acumulación. 	<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Proceso sencillo que requiere poco equipo ▪ No hay costos de transportes involucrados ▪ Consume poca energía ▪ Requiere de poco personal para su implementación y desarrollo ▪ Es seguro ▪ No se necesita infraestructura en tierra. ▪ No necesita espacio adicional para almacenamiento ▪ No tiene restricciones a causa del clima <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requiere el manejo de los componentes del fluido que se descarga 	<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ No presenta emisiones al aire ▪ Utiliza poca energía ▪ No requiere consideraciones ambientales para sitios en tierra <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pueden generarse impactos ambientales a corto plazo sobre la biología del suelo marino

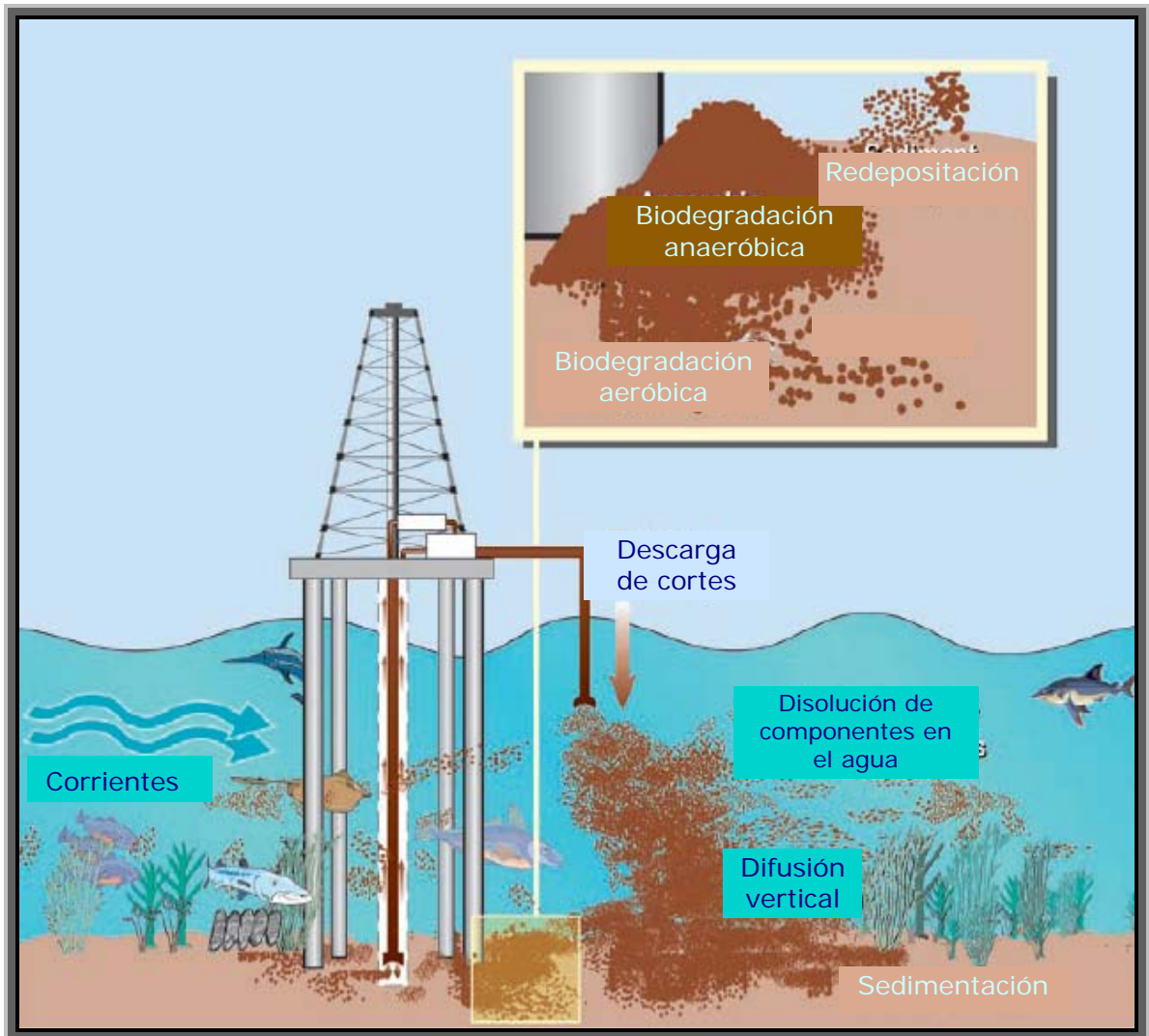
FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

4.1.2 Descarga de lodos base aceite. La descarga de lodos base aceite y cortes asociados está prohibida en casi todo el mundo. El lodo debe ser reciclado y los cortes almacenados y transportados a tierra para su tratamiento y disposición final. El almacenamiento y transporte de los cortes genera problemas logísticos aumentando los costos de operación.¹⁹

4.1.3 Descarga de lodos base sintética. Debido a su alto costo, el lodo debe ser reciclado. Los cortes pueden ser descargados directamente después de alcanzar los requerimientos legales de la zona. La capacidad de descargar los cortes in situ es el elemento clave para hacer factible el uso de SBM.¹⁹ La Figura 12 muestra un esquema de lo que sucede alrededor de una plataforma al descargar lodos base sintética.

4.1.4 Costos asociados. Incluye el posible uso de un fluido base más costoso y los monitoreos ambientales que se deben hacer en el suelo marino. Los estudios de monitoreo ambiental se realizan por regiones, por lo tanto el costo puede ser compartido entre un determinado número de pozos. Un estudio básico de monitoreo puede costar US \$400,000 e incluye la recolección de muestras y la entrega del análisis de la zona específica. Un estudio regional más detallado puede llegar a costar US \$3,000,000.¹⁰

FIGURA 12. Descarga de lodos base sintética



FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

4.2 REINYECCIÓN

El uso de la reinyección como opción de disposición de desechos reduce drásticamente, aunque no en su totalidad, el impacto en el suelo marino y el uso de terrenos continentales para rellenos. En algunos casos, donde hay una plataforma fija para desarrollar varios pozos, y se tienen

las condiciones adecuadas de la formación geológica, la reinyección ha mostrado muy buenos resultados. Por ejemplo, en una plataforma de desarrollo en el Mar del Norte²¹, la experiencia de inyectar los cortes fue positiva trayendo ventajas operacionales y ahorro de tiempo. Durante este desarrollo, los cortes, los residuos aceitosos y el agua de desecho fueron inyectados en un pozo destinado para este fin, que luego fue completado para producción. Usar un pozo específico minimiza ciertos problemas mecánicos como erosión y colapso del revestimiento, que se presentan generalmente en pozos productores destinados a reinyección. Aunque están disponibles un número de opciones, la combinación de las condiciones geológicas, el desarrollo de un escenario que utiliza pozos dedicados específicamente para inyección y las implicaciones legales, hacen que la reinyección sea una opción viable en esta situación considerando los costos, ventajas operacionales y ambientales.¹⁵

La reinyección ofrece un número de ventajas económicas y ambientales adicionales en la disposición de los desechos aceitosos cuando se reinyecta en una formación productora depletada, simplemente se devuelve a sus condiciones originales eliminando el riesgo de contaminación a largo plazo.

En un proceso normal de reinyección se seleccionan los cortes por tamaño, se trituran y se mezclan con agua fresca, de mar o de producción para formar la lechada que se inyecta en la formación a alta presión. Esto se realiza en etapas que pueden durar unas horas o varios días. La concentración de sólidos en la lechada está entre el 30 y 40% en volumen para materiales de grano fino ($< 150 \mu\text{m}$) y de 20% para material grueso. La inyección se realiza a tasas relativamente altas (5 a

10 bbl/min) para mantener el flujo turbulento y evitar la segregación de los sólidos en el hueco.

La Figura 13 muestra un equipo compacto para operaciones de reinyección costa afuera. Los sólidos entran por la parte superior del tanque cónico y se mezclan con agua de mar en el tanque siguiente. La mezcla es circulada a través de una bomba centrífuga que tritura los sólidos a la medida requerida. Después se envía a un tanque de almacenamiento para luego ser inyectada en la formación por medio de bombas triplex. Este sistema está diseñado para trabajar de acuerdo a la tasa de penetración del equipo de perforación, obteniendo un volumen de inyección de 200 barriles por etapa.

El objetivo a gran escala es disponer la mayor cantidad de sólidos posible dentro de la formación escogida. Esto se obtiene empacándolos en fracturas cortas, de poco espesor y orientadas de manera horizontal, que permiten el transporte del fluido rápidamente. La formación ideal debe estar a una profundidad entre 500 y 5,000 pies, debe tener continuidad lateral, y, una estratigrafía alternada de arenas y arcillas. La formación suprayacente debe ser impermeable y dúctil.²²

Las dos formas comunes para inyectar los desechos son la inyección anular y la inyección por medio de un pozo de disposición (Ver Figura 14). La inyección anular introduce la corriente de desechos a través del espacio entre dos secciones del revestimiento. La corriente de desecho entra a la formación por debajo del final del revestimiento más externo. La inyección en pozos de disposición se puede realizar por debajo de

todo el revestimiento o por una sección perforada del revestimiento a la profundidad de la formación receptora.

FIGURA 13. Equipo compacto para operaciones de reinyección costa afuera

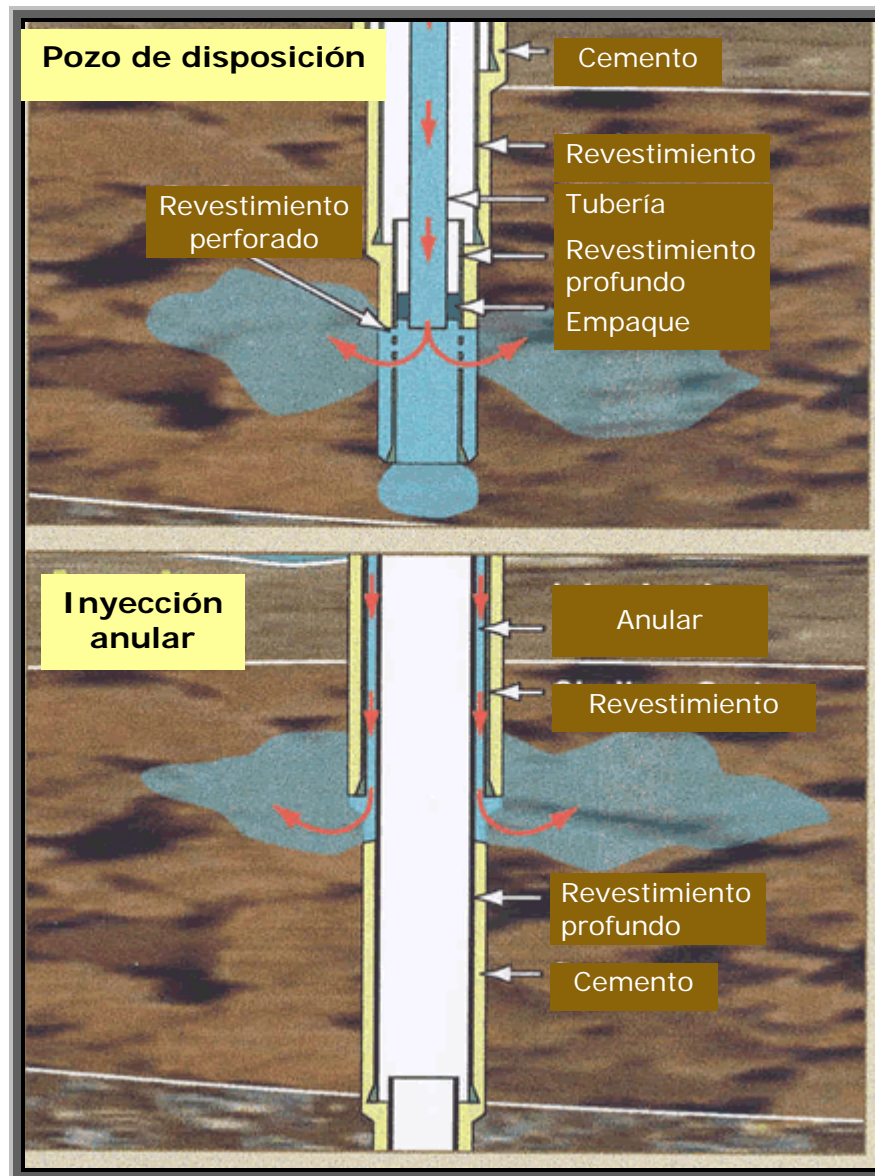


FUENTE: SPE 77553.

Un detallado análisis técnico debe realizarse para evaluar la conveniencia del sitio y las operaciones para la reinyección. La presencia de una formación geológica adecuada capaz de aceptar y contener los desechos a largo plazo, es una situación crítica para la operación.

Además, la lechada a inyectar no debe presentar ninguna amenaza a las operaciones de perforación o de producción.

FIGURA 14. Inyección en pozo de disposición e inyección anular



FUENTE: <http://web.ead.anl.gov>

Esta técnica se usa en tierra y en plataformas marinas que tengan cabezales de pozo en superficie. En vista de que la tecnología para la inyección a través de cabezales submarinos desde facilidades flotantes y en aguas profundas no se ha desarrollado completamente la técnica no es aplicable en este momento a campos en aguas profundas que estén desarrollados con cabezales submarinos.

Las implicaciones logísticas también limitan su aplicación. Por ejemplo, las unidades de perforación de *Mobile Offshore*, que realizan pozos sencillos de exploración, no cuentan con el espacio suficiente para el equipo adicional y almacenaje de desechos.

En general, esta opción puede ser la más práctica y económica en campos en desarrollo donde hayan sido perforados un número de pozos desde una sola ubicación.

Una ventaja de la reinyección con respecto a la descarga es que evita completamente el arrojado de cortes y fluidos asociados en el mar. Con respecto a la disposición en tierra, se elimina el uso de espacios para relleno y el impacto potencial asociado a las fuentes de agua subterránea. En algunos casos, dependiendo de la técnica de disposición en tierra empleada y la distancia entre la plataforma y el sitio, la reinyección utiliza menos combustibles y por tanto reduce las emisiones al aire.

Los cortes de perforación han sido inyectados exitosamente en un número de áreas que incluyen el Mar del Norte, el Golfo de México, Alaska y Canadá.¹⁵

Finalmente, el costo de la reinyección para volúmenes de desecho moderados a altos, es menor en comparación con las opciones en tierra que requieren transporte para la disposición.

Las ventajas y desventajas asociadas con la reinyección se presentan en la Tabla 2.

4.2.1 Costos asociados. Depende del costo del pozo de disposición y la operación de los equipos de superficie. El costo de un pozo de disposición puede llegar a ser más alto que el de un pozo productor. La utilización de un pozo para inyección le cuesta a cada pozo productor alrededor de US\$300,000 con un costo diario de operaciones de la planta en superficie de US\$2,500.^{10,15}

TABLA 2. Ventajas y desventajas de la reinyección de cortes.

Económico	Operacional	Ambiental
<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Posibilidad de utilizar un lodo de perforación más barato ▪ No se necesita transporte ▪ Capacidad de disponer ciertos residuos que usualmente se llevan a tierra <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso es costoso ▪ El tiempo muerto de los equipos puede detener otras actividades de perforación 	<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Los cortes se inyectan después de un tratamiento previo ▪ Tecnología probada <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Requiere equipos especiales y mucho tiempo de trabajo ▪ Para su aplicación se requiere de una formación receptora con propiedades adecuadas ▪ Depende del diseño del revestimiento y el cabezal del pozo ▪ Sobre-presión y comunicación entre pozos adyacentes ▪ Eficiencia variable ▪ Resulta difícil de aplicar en pozos exploratorios debido a la carencia de datos acerca de la formación ▪ Se tiene poca experiencia en operaciones desde barcos perforadores y en aguas profundas 	<p style="text-align: center;">Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eliminación del impacto en el suelo marino ▪ Poca posibilidad de contaminación de aguas superficiales y subterráneas <p style="text-align: center;">Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se aumenta la contaminación del aire debido a los altos requerimientos de potencia de los equipos ▪ Posibilidad de romper el suelo marino si el diseño no es apropiado

FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

4.3 DISPOSICIÓN EN TIERRA

Los cortes y fluidos asociados se recogen y transportan para su tratamiento y disposición final por técnicas como rellenos, compostaje, esparcimiento en tierra (*landspreading*) o reutilización. Estos son los mismos que se describen en el capítulo 3 como procesos a los residuos de perforación en tierra.

Dentro de estas opciones hay una variedad de alternativas. Para tomar una decisión con respecto a la disposición de los cortes, se debe considerar no sólo el impacto ambiental, también se debe considerar el posible impacto de la alternativa misma. Estos impactos incluyen costos, uso de recursos, emisiones, riesgos en el transporte y manejo, riesgos ocupacionales y exposición a productos químicos.

Todos estos factores se evalúan por medio de un cuadro comparativo (Tabla 3) que relaciona el aspecto ambiental, operacional y económico (costo beneficio) de las opciones.¹⁵

TABLA 3. Parámetros para evaluar las opciones de disposición

Económico	Operacional	Ambiental
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costos inmediatos ▪ \$/m³ para disposición ▪ Costo de energía ▪ Costos de mantenimiento ▪ Costos de trabajo ▪ Costos de equipo ▪ Costos de transporte ▪ Costos de disposición de los productos finales ▪ Futuras obligaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seguridad ▪ Salud humana. Exposición a químicos ▪ Velocidad de procesamiento ▪ Tamaño y portabilidad de las unidades ▪ Espacio disponible ▪ Requerimientos de energía ▪ Condiciones de los productos finales ▪ Condiciones ambientales ▪ Disponibilidad de facilidades apropiadas. Infraestructura 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisiones al aire provenientes de la perforación y las operaciones de apoyo ▪ Requerimientos de potencia ▪ Reducción en volumen de los desechos ▪ Productos secundarios del proceso ▪ Acorde con las regulaciones ▪ Especies marinas potencialmente en peligro ▪ Remoción de hidrocarburos de sólidos y agua ▪ Remoción de metales pesados de sólidos y agua ▪ Consideraciones ambientales en el sitio de disposición en tierra si es necesario

FUENTE: Reporte No. 342 Association of Oil and Gas Producer, OGP.

4.4 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos de las opciones de disposición de desechos depende del valor de los equipos de perforación, el lodo, el equipo de control de sólidos, el transporte y manejo de los cortes, equipo para inyección de cortes y tratamientos en tierra. El precio de estos ítem varía alrededor del mundo. La estimación del costo de disposición también depende de las suposiciones formuladas para el análisis, por ejemplo la cantidad de desechos por pozo, el tiempo requerido para perforar y el aumento de tiempo estimado debido a fallas en los equipos o al mal clima.¹⁵

Algunos factores que deben tenerse en cuenta se describen a continuación.

4.4.1 Tiempo de perforación. El tiempo utilizado para perforar un pozo varía dependiendo de las especificaciones geológicas del área y cualquier reto técnico que se presente.

El alquiler de los equipos es el costo más alto que se presenta en las operaciones de perforación. Este depende de las capacidades técnicas del equipo, la región donde se va a perforar y las negociaciones que se logren entre los operadores y las compañías de perforación.

El tiempo requerido para perforar un pozo es importante por dos razones. Primero, puede presentarse un incremento en los costos debido a la reducción de la tasa de perforación asociada a la opción de disposición. Por ejemplo, utilizar WBF en lugar de OBM o SBM puede evitar el costo de tratamiento a los cortes no descargables, pero puede

retrasar las operaciones de perforación debido a las condiciones técnicas del lodo. Seleccionar una opción de disposición en tierra implica un costo adicional debido a que las condiciones climatológicas pueden impedir el embarque de los desechos aumentando el tiempo de perforación. Segundo, el costo del alquiler y operación de los equipos asociados a la opción de disposición es proporcional al tiempo necesario para terminar el pozo.

El tiempo para perforar un pozo varía de acuerdo a las dificultades técnicas que se presenten en el proceso. Se estima un rango de 30 a 45 días para pozos en aguas cuya profundidad sea menor a 900 pies y de 60 a 90 días para pozos en aguas profundas.

La selección de una opción de disposición que no permita descarga al mar puede incrementar el tiempo de perforación. La máxima tasa de penetración se ve limitada por la capacidad de manejo de cortes del equipo de control de sólidos, la planta de reinyección y las operaciones de embarque.

La renta diaria de un equipo de perforación incluye costos de operación directos y cualquier servicio de transporte, sea en helicóptero o en barco. Para una perforación en aguas profundas donde se utiliza lodo sintético, el costo estimado de operación es de US\$300,000/día.¹⁵

4.4.2 Consumo de lodo de perforación. El consumo neto de lodo se debe a tres factores: retención de lodo en los cortes, pérdidas en el pozo y pérdidas debido a operaciones de mantenimiento. El precio del lodo varía de acuerdo a sus características y desempeño técnico.¹⁵

5 NORMAS AMBIENTALES

Preservar y mantener el medio en que vivimos, del cual tomamos los recursos necesarios para nuestro bienestar, es de suma importancia en el momento de decidir el uso de un tipo específico de lodo de perforación y la implementación de una tecnología de disposición de desechos adecuada.

Para lograr este fin se han establecido numerosas regulaciones y entes encargados de su cumplimiento en las diferentes áreas alrededor del mundo, donde se producen hidrocarburos en aguas marinas.

5.1 SISTEMAS DE REGLAMENTACIÓN

La elaboración de las leyes y la forma de hacerlas cumplir es responsabilidad de las autoridades nacionales competentes. Las condiciones internacionales las implementan autoridades nacionales por medio de legislación primaria. Esto se apoya generalmente en un conjunto de normas y lineamientos guía que proporciona información detallada sobre un tema específico. El enfoque tradicional de la legislación establecida se ha complementando por medio de evaluaciones de desempeño, objetivos propuestos, acuerdos negociados y auto regulación. Los permisos afectan definitivamente el planeamiento, desarrollo y condiciones de operación. Estos deben ser previamente conocidos para lograr la aprobación de la licencia.²³

El resultado formal de una Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) es la base para obtener los permisos para las principales actividades de la industria.

Entre los factores necesarios para la aplicación efectiva de la legislación ambiental se incluyen²³:

- Leyes, regulaciones y lineamientos guía adecuados, tanto internacionales como nacionales.
- Procedimientos coherentes para tomar decisiones con respecto a proyectos y actividades.
- La legislación debe presentar claramente las responsabilidades y obligaciones apropiadas.
- Adecuado monitoreo de los procedimientos y protocolos.
- Reportes de desempeño.
- Existencia de consultas adecuadas y procedimientos de apelación.
- Sanciones apropiadas y voluntad política para su cumplimiento.

5.2 SISTEMAS INTERNACIONALES Y REGIONALES

Los tratados y convenciones mundiales y regionales son, en principio, quienes comprometen a los gobiernos y los obligan a implementar este

tipo de reglamentación en sus áreas. Sin embargo, la velocidad y el tiempo de implementación en el ámbito nacional son muy variables. En consecuencia, es prudente para la industria internacional asegurar que los tratados se respeten sin importar el momento en que el país haga cumplir la legislación pertinente.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo realizada en Río de Janeiro en 1992, conocida como "La Cumbre de la Tierra", concentró la atención mundial en los cercanos vínculos que existen entre el medio ambiente y el desarrollo socio-económico. Durante la conferencia se trataron temas ambientales de importancia global que resultaron en la formulación de dos convenciones (la Convención de Cambio Climático y la Convención de la Diversidad Biológica, esta última busca detener la pérdida de especies animales y vegetales), así como la Declaración de Río y la Agenda 21.

Otros instrumentos internacionales con que se cuenta son las Convenciones sobre Mares Regionales, entre ellas OSPAR (Oslo-Paris) que aplica en el Atlántico Nororiental y en el Mar del Norte, "Barcelona" para el Mar Mediterráneo y "Kuwait" para el Medio Oriente.

Los sistemas regionales se basan en las consideraciones económicas y sociales comunes. La Unión Europea es un ejemplo donde los principios ambientales regionales y los objetivos se implementan a través de la legislación nacional de cada uno de los estados pertenecientes. Estos principios son: acciones preventivas, rectificación en la fuente de un daño ambiental, y la integración de los aspectos ambientales con otras políticas de la comunidad.

La industria internacional de exploración y producción toma como principios sus objetivos propuestos y la auto regulación, desarrollando acciones independientes para promover un buen nivel de desempeño ambiental, a través del establecimiento de líneas guía y cartas internacionales de negocios. Sin embargo, estas definiciones no aplican para todos los ecosistemas, por lo tanto se deben hacer ajustes dependiendo de las circunstancias específicas. Las compañías adoptan políticas y códigos para guiar a su personal, contratistas y proveedores. Está en manos de los gobiernos el cabal cumplimiento de los códigos y sigue siendo la piedra angular en la protección del ambiente.²³

5.2.1 Convención OSPAR. La Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico Nororiental, conocida como OSPAR (1992), es el fundamento para las leyes nacionales que rigen la descarga de desechos de perforación en las aguas de los países miembros: Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Islandia, Irlanda, Holanda, Noruega, Portugal, España, Suiza y el Reino Unido.

Actualmente es legal la descarga de cortes asociados a WBF en las aguas de los países miembros cuyo contenido de aceite sea menos del 1% en peso y que el material haya pasado las pruebas para demostrar su biodegradabilidad en un tiempo específico y que no presente bioacumulación.

Entre los principios fundamentales para regular las descargas se tiene en cuenta la persistencia, toxicidad u otras propiedades nocivas, y la tendencia a la bioacumulación de los componentes químicos de los desechos.

En los términos de la Convención se incluyen una serie de químicos que cumplen con los parámetros a continuación:

- No se degradan fácilmente por procesos naturales.
- Elevan la peligrosa acumulación de material dañino para las cadenas alimenticias.
- Ponen en peligro el bienestar de los organismos vivientes ocasionando cambios indeseables en el ecosistema marino.
- Interfieren seriamente la recolección de productos marinos.

Debido a esto se considera que los siguientes compuestos deben ser tratados con precaución:

Compuestos órgano halógenos o sustancias que puedan llegar a formarlos en el ambiente marino, mercurio y cadmio y compuestos que contengan estos elementos, materiales sintéticos persistentes que puedan flotar o permanecer en suspensión, aceites persistentes e hidrocarburos provenientes del petróleo.

Se incluyen, además, otros compuestos con características similares a los anteriores pero que se consideran menos nocivos y presentan un tiempo de degradación razonable por medio de procesos naturales: compuestos orgánicos con fósforo, aceites no persistentes y elementos como Arsénico, Plomo, Cromo, Níquel, Cobre y Zinc.²⁴

5.3 SISTEMAS NACIONALES

Las regulaciones ambientales se encuentran en una variedad de leyes nacionales propias de cada país. En algunos casos se incluyen en cláusulas insertas en leyes petroleras y de planeamiento; en otros países, se ha desarrollado una reglamentación específica que cuenta, entre otras, con evaluaciones ambientales, calidad del aire y el agua, protección de cuerpos de agua, seguridad y salud ambiental, áreas protegidas.

Las leyes petroleras raramente imponen requerimientos detallados para programas de control ambiental, pero proveen las guías para incorporar regulaciones subordinadas, por ejemplo, un requerimiento para preparar las evaluaciones ambientales, planes para la disposición de residuos, control de emisiones y descarga, preparación de planes de emergencia, control de sustancias peligrosas, recuperación de sitios afectados por accidentes.

Algunos ejemplos de leyes que se aplican a las operaciones petroleras en diferentes países son: leyes petroleras, leyes de planeamiento, actas de protección del ambiente, límites de componentes químicos en los desechos, disposición y manejo de los residuos, leyes de protección para parques y reservas naturales, protección de la pesca y actividades económicas marinas de la comunidad.

La adquisición de los derechos para realizar operaciones petroleras autoriza al contratista / operador para explorar y explotar un área dada. Si se descubren hidrocarburos, se deben obtener los permisos

necesarios tales como licencia de desarrollo con la presentación de un plan detallado, un permiso de planeamiento que involucra la evaluación ambiental y un permiso de operación para el cual se necesita información detallada de las actividades operacionales, controles y límites.

Los estándares ambientales para aire, agua, suelo, ruido y exposición a químicos se desarrollan con referencia a la capacidad de carga del ambiente y de la tecnología con que se cuenta. La protección de la vida silvestre y los valores naturales son más difíciles de interpretar en términos operacionales. Se debe hacer por medios cualitativos.

Al empezar las operaciones se necesita el monitoreo constante, ya sea por legislación, a través de inspecciones de la autoridad encargada, o la industria misma, si aplica auto regulación. Dependiendo de los términos de referencia del acuerdo realizado entre la compañía y el gobierno, las responsabilidades pueden recaer sobre uno o hacerse compartidas. La continuidad de una licencia para operar depende de la aprobación periódica de los requerimientos establecidos a través de reportes y programas de auditoría.²³

5.3.1 Normatividad Federal para los Estados Unidos

5.3.1.1 Acta del Agua Limpia (*Clean Water Act CWA*). El objetivo principal del Acta Federal para el Control de la Contaminación del Agua, es restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas superficiales de la nación.

El Acta regula las descargas directas e indirectas. El Sistema Nacional de Eliminación de Descargas (NPDES) permite el control de las descargas directas en aguas navegables (CWA Sección 402). Los permisos otorgados por el NPDES exigen información específica de la industria, tecnología base usada, límites base de calidad del agua y reporte de los contaminantes presentes. Luego de analizar la información requerida se deciden las condiciones y límites del efluente bajo las cuales el solicitante puede hacer la descarga.²⁵

5.3.1.2 Código Federal de Regulaciones (CFR). Contiene todas las normas publicadas en el Registro Federal por los departamentos ejecutivos y las agencias del Gobierno Federal. Está dividido en 50 títulos que representan todas las áreas sujetas a regulación federal, y, en el título 40 se incluyen las concernientes al medio ambiente. Los títulos son revisados y actualizados anualmente.²⁶

5.3.1.3 Título 40. Protección del medio ambiente. En el Título 40, Capítulo I, Subcapítulo H, se establecen los procedimientos y criterios para la solicitud del permiso de la EPA conforme a la sección 102 del Acta. También establece los criterios para la revisión de las actividades relacionadas con el transporte de desechos con fines de disposición en aguas oceánicas y las excepciones que se requieran.²⁷

5.3.2 Agencias reguladoras. Las agencias encargadas de regular la descarga de desechos en aguas de los Estados Unidos son: el Servicio de Manejo de Minerales (MMS) y la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA).

5.3.2.1 Servicio de Manejo de Minerales (MMS). El MMS es una oficina del Departamento de Interior que administra los recursos minerales de las plataformas continentales. Hay tres regiones definidas: el Golfo de México, Alaska y el Pacífico.²⁸ Con respecto al manejo de desechos de perforación se aplican las siguientes normas.

5.3.2.1.1 Disposición de desechos. Para este fin se recomienda la inyección de los desechos de operaciones de perforación y producción en pozos especiales o la encapsulación en pozos abandonados. La aplicación de una opción de disposición debe ser autorizada caso a caso por el MMS (30 CFR §250.300(b)(2)).²⁸

5.3.2.1.2 Criterios para la inyección. Si se decide la inyección de desechos, el punto de inyección debe estar por debajo de las fuentes de agua potable, y debe ser aislada por encima y por debajo con capas de arcilla. Los operadores deben demostrar que los pozos de inyección presentan integridad mecánica.²⁸

5.3.2.1.3 Criterios para encapsulación. Se pueden utilizar dos maneras de encapsulación. La primera consiste en ubicar los desechos directamente en un pozo abandonado. La segunda consiste en ubicar los desechos en una sección de tubería, sellarla y bajarlos al pozo. En ambos casos, el pozo seleccionado no debe intersectar líneas de fallas que conduzcan al suelo marino. El tope de los desechos encapsulados debe estar por lo menos a 1,000 pies por debajo de la línea de lodo. También deben ser aislados de cualquier anular abierto por medio de un tapón de cemento de 200 pies de largo.²⁸

5.3.2.2 Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA).

La EPA se encarga de establecer los lineamientos y estándares por categorías de las descargas industriales, basándose en el grado de control de la contaminación que se puede alcanzar utilizando diferentes tecnologías. Los lineamientos y estándares se resumen a continuación.¹⁰

5.3.2.2.1 Mejor Tecnología de Control Posible Actualmente Disponible (BPT).

La sección 304(b)(1)(A) de la CWA exige a la EPA identificar el nivel de reducción de efluentes alcanzable por medio de la BPT, por clases y categorías del punto fuente. Generalmente, estos niveles se determinan con base en el promedio de las tecnologías que muestran el mejor desempeño en plantas de varios tamaños, con diferentes tiempos de operación y unidades de proceso para cada categoría industrial.¹⁰

5.3.2.2.2 Mejor Tecnología Convencional para el Control de la Contaminación (BCT).

La enmienda hecha en 1977 a la CWA, establece la BCT como un nivel de control adicional para la descarga de contaminantes convencionales en puntos fuente existentes. La sección 304(a)(4) designa como contaminantes convencionales a aquello que afecten la Demanda Bioquímica de Oxígeno, el total de sólidos suspendidos (TSS), materia fecal, aceites y grasas, entre otros.¹⁰

5.3.2.2.3 Mejor Tecnología Disponible Económicamente Viable (BAT).

La CWA establece la BAT como un medio para controlar las descargas de contaminantes tóxicos y no convencionales. Los contaminantes tóxicos son definidos en la sección 307(a) CWA. Los

contaminantes no convencionales son todos aquellos que no se encuentran en la lista del Administrador. En general, los lineamientos para la limitación de efluentes por BAT se basan en el mejor desempeño existente y económicamente viable en cuanto a descargas industriales. Entre los factores considerados están los costos, el tiempo de servicio de los equipos y facilidades involucradas, el proceso empleado, los aspectos de ingeniería de la tecnología de control. La limitación por BAT se basa en la reducción del efluente alcanzable a través de cambios que se hagan en los procesos y operaciones en las facilidades.¹⁰

5.3.2.2.4 Estándares de Desempeño para Fuentes Nuevas (NSPS). Muestra la reducción que se puede alcanzar basada en la mejor tecnología de control demostrada. Las nuevas facilidades tienen la oportunidad de instalar los mejores y más eficientes procesos de producción y las tecnologías para el tratamiento de desechos.¹⁰

5.3.2.2.5 Mejores Prácticas de Manejo (BPM). La sección 304(e) de CWA autoriza al Administrador para publicar las regulaciones, además de las ya descritas, para el control de escurrimientos, derrames, disposición de desechos y drenaje de materiales almacenados que puedan aumentar la cantidad de tóxicos y contaminantes peligrosos en el agua.¹⁰

5.3.2 COLOMBIA

5.3.2.1 Protección del Medio Marino y Costero. Desde su creación en 1952, la Dirección General Marítima ha dirigido grandes esfuerzos hacia la prevención, preservación, protección y conservación del medio ambiente marino, en cumplimiento del mandato legal. Compromiso reafirmado con la promulgación de la Ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente. En su artículo 103 se le confirman funciones a la Armada Nacional en lo referente al control y vigilancia en materia ambiental y de los recursos naturales, en los mares y zonas costeras, así como la vigilancia, seguimiento y evaluación de los fenómenos de contaminación o alteración del medio marino.

Las acciones que realiza la Armada Nacional a través de la Dirección General Marítima en el campo científico y de vigilancia, seguimiento y evaluación de la contaminación marina, se realizan en sus centros de investigación: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), en el Atlántico; Centro de Control de la Contaminación del Pacífico (CCCP); y de las Capitanías de Puerto, respectivamente. Así mismo, el Cuerpo de Guardacostas de la Armada Nacional, de acuerdo con lo dispuesto en el Decreto 1874 de 1979, cumple importantes funciones en materia de protección del medio marino contra la contaminación.²⁹

5.3.2.2 Fuentes de Contaminación. Los impactos ambientales en el medio marino generados por buques, operaciones petroleras y fuentes terrestres de contaminación vienen causando importantes cambios y daños en los ecosistemas marinos y costeros, generando pérdidas

económicas. Hoy por hoy, es necesario conocer las tendencias y el comportamiento de los niveles de concentración de contaminantes de mayor incidencia en el medio marino y costero (hidrocarburos, pesticidas, metales pesados y materia orgánica) y sus efectos socioeconómicos.

5.3.2.3 Acciones. La Dirección General Marítima, para cumplir con la normatividad nacional en materia ambiental y con las directrices y compromisos internacionales como los de la Agenda 21 de la conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, ha efectuado programas de monitoreo, vigilancia y control del medio ambiente marino colombiano que han permitido determinar condiciones iniciales de referencia, las cuales contribuyen a la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes.²⁹

5.3.2.4 Ministerio del Medio Ambiente. El Ministerio del Medio Ambiente es la entidad responsable del medio ambiente de Colombia y el organismo rector del manejo y aprovechamiento racional de los recursos naturales. Define las políticas y regulaciones acerca de la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables.

A partir de la expedición del Código de los Recursos Naturales (Decreto 2811 de 1974) y de la Ley 99 de 1993 que creó el Ministerio del Medio Ambiente - MMA como ente rector de la gestión del medio ambiente y los recursos naturales renovables del país, se ha expedido la normatividad relacionada con el manejo y uso de los recursos naturales.

En el marco de las regulaciones, el MMA debe crear mecanismos eficaces de compilación, análisis y sistematización de la información que sirva por una parte, como marco para el futuro diagnóstico y formulación de las políticas y normas en cada uno de los sectores o componentes ambientales.

En octubre de 1996 el Ministerio de Medio Ambiente presentó ante el Consejo Nacional Ambiental el documento Lineamientos de Política para el Manejo Integral del Agua, que contiene conceptos e información para promover la coordinación intersectorial que el manejo del agua requiere, desde las perspectivas de la oferta y demanda del recurso, su calidad y los aspectos institucionales pertinentes.³⁰

Entre los instrumentos internacionales acogidos por Colombia relacionados con el tema, se destacan³¹:

- Convenio internacional para Prevenir la Contaminación por Buques 1973 y su Protocolo de 1978, conocido internacionalmente como MARPOL 73/78, adoptado por la Ley 12 de 1981 y de obligado cumplimiento para todos los buques que por sus características de construcción y diseño, así lo ameriten. Igualmente, será reglamentado para los buques que no estén cubiertos, mediante decreto actualmente en trámite.

- Convenio internacional sobre responsabilidad civil por daños causados por la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos y su Protocolo de 1976 (CLC 69/76), acogido por la Ley 55/89 y su protocolo de 1992 aprobado por ley 523/99. Tiene como objetivo

garantizar a todos los perjudicados a causa de la contaminación por hidrocarburos, una indemnización adecuada por parte del causante.

- Convenio internacional sobre la constitución de un fondo internacional de indemnización de daños causados por la contaminación de hidrocarburos y su Protocolo de 1976 (FONDO 71/76), aprobado por Ley 257/96 y su protocolo de 1992 aprobado por ley 523/99. Es un instrumento complementario de CLC/69 que actúa cuando la indemnización de éste último no es suficiente. Aquí el pago está a cargo del propietario de la carga y del armador.

5.3.2.5 Plan Nacional de Contingencia (PNC). Otro campo no menos importante es el referente a la formulación y participación en el Plan Nacional de Contingencia (PNC) contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en Aguas Marinas, Fluviales y Lacustres, aprobado por el decreto 321/99.

El PNC es un instrumento técnico y operativo que le permite al país actuar de la mejor manera posible mediante la coordinación de todas las entidades y personas que pueden aportar para resolver una emergencia y minimizar el impacto ambiental negativo en caso de un derrame de hidrocarburos, derivados o sustancias nocivas en cualquier cuerpo de agua del territorio nacional.

En la elaboración de este Plan participaron: la Armada Nacional a través de la Dirección General Marítima; ECOPETROL y las demás empresas petroleras que operan en el país, a través de la Asociación Colombiana de Petróleos; la Dirección General para la Prevención y Atención de

Desastres; el Consejo Colombiano de Seguridad; los Ministerios de: Interior, Defensa, Transporte, Minas y Energía, Desarrollo y del Medio Ambiente así como las demás entidades con alguna inherencia en los temas que se consideraron pertinentes.

El PNC, además de ser un elemento importante de la Política Nacional para la protección del medio ambiente acuático y continental en el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres, es también la base para el desarrollo de los programas de Cooperación Regional cuyo fin es combatir la contaminación por derrame de hidrocarburos y sustancias nocivas.³¹

6 METODOLOGÍA

La metodología permite identificar el tipo de proceso y la opción de disposición más adecuados que se aplique a los desechos de perforación generados costa afuera, por medio del análisis de la información recopilada en una serie de criterios específicos de selección.

6.1 Criterios de selección.

La metodología está integrada por siete criterios que proporcionan la información necesaria para caracterizar una situación específicamente, con respecto a condiciones operacionales, ambientales, sociales y económicas para luego definir las características del proceso de tratamiento y la opción de disposición de desechos que más se ajuste a los criterios.

6.1.1 Tipo de lodo. El tipo de lodo determina varias características para el diseño de las estrategias de tratamiento y disposición de desechos de perforación debido a las diferentes composiciones, ventajas y desventajas operacionales que presenta cada uno de los tipos de lodo estudiados. Son estas, el nivel de toxicidad de los residuos, el volumen de los cortes generados y la cantidad de lodo presente en ellos, el espacio requerido en la plataforma de perforación y las etapas del proceso de separación de sólidos.

6.1.2 Profundidad del agua y de la perforación. Con la profundidad del agua y de la perforación se determina la cantidad de lodo a utilizar y el volumen de residuos generados durante la perforación. Además, el rendimiento de los tipos de lodo se afecta con la profundidad y, por consiguiente, con la temperatura. En perforaciones profundas los lodos base agua no son una opción viable. En estas situaciones se prefieren los lodos sintéticos o base aceite.

6.1.3 Distancia a la costa. Esta distancia sirve para establecer si el proceso de tratamiento se realiza en tierra o directamente en la plataforma. El costo del transporte de residuos es, generalmente, alto y depende directamente de esta distancia. También los tiempos de reabastecimiento están ligados con este factor.

6.1.4 Características físicas y operacionales del equipo de perforación. Se debe tener en cuenta el espacio disponible para el montaje de los equipos necesarios para aplicar el proceso de tratamiento y la posible opción de disposición, la capacidad de almacenamiento de lodo y de cortes y los tiempos de reabastecimiento de la plataforma.

6.1.5 Condiciones climatológicas. La precipitación, las tormentas, la temperatura y humedad, las condiciones de visibilidad y nubosidad, el régimen de vientos y el régimen de olas y corrientes afectan tanto las operaciones en superficie como el desarrollo en fondo. Debido a las condiciones climatológicas es posible que se retrasen los itinerarios establecidos para el buen desarrollo de las estrategias de manejo de residuos. Se pueden alterar los tiempos de entrega de los suministros

necesarios y el transporte de desechos a tierra. Por lo tanto, se debe estudiar y aprovechar el periodo en que las condiciones climáticas ofrezcan garantías para el desarrollo de las operaciones tanto de instalación como de operación y mantenimiento. Las corrientes submarinas ayudan a la dispersión de los materiales de desecho que se descargan en el mar.

6.1.6 Consideraciones ambientales. Las consideraciones ambientales son establecidas y controladas para cada zona específicamente. Se debe tener en cuenta la presencia de asentamientos de vida marina tanto en la columna de agua como en el fondo del mar para no influir, o reducir, el efecto sobre estas especies y su hábitat natural. Se debe tener especial cuidado en zonas donde exista una comunidad que dependa de los productos extraídos del mar para no afectar su desarrollo socio económico. Es recomendable realizar estudios sobre el impacto que los contaminantes tienen en las especies propias de la región para determinar el grado de afectación y estimar los límites de resistencia del medio marino.

6.1.7 Factor económico. El costo de implementación, puesta en marcha operación y mantenimiento de las estrategias para el manejo de desechos varía considerablemente. Al seleccionar la más apropiada, el factor económico no debe ser ni el primero, ni el principal criterio de selección. Antes que eso debe verse el impacto ambiental que cada una de las opciones genera sobre el medio marino. Después, contando con la capacidad de inversión de la empresa se seleccionará la que brinde la mejor relación costo beneficio.

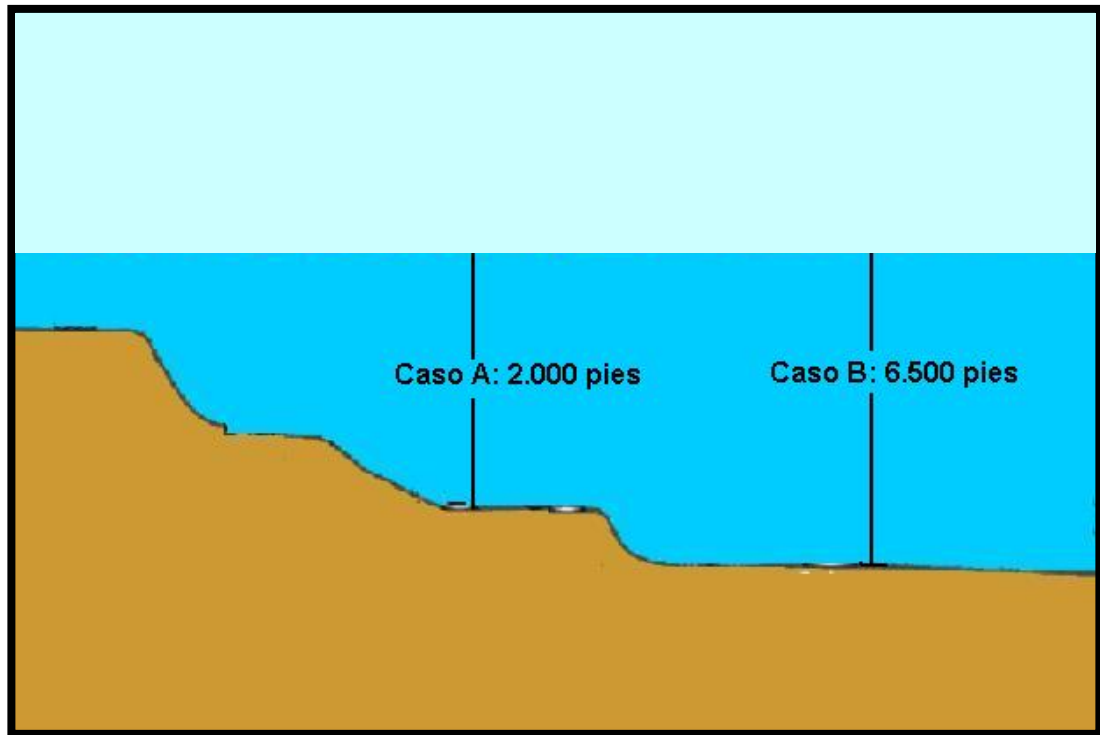
7 CASOS ESTUDIO

Para aplicar la metodología a las condiciones del mar Caribe colombiano se tomaron como referencia dos locaciones utilizadas en el proyecto de grado ANÁLISIS DE LA POSIBLE UNIDAD DE PERFORACIÓN A EMPLEARSE EN EL PROSPECTO BAHÍA EN EL CARIBE COSTA AFUERA³². Este libro proporciona parte de la información requerida para aplicar los criterios de selección de los procesos de tratamiento y las opciones de disposición de desechos de perforación. Los demás datos se presentan ajustándose a las condiciones del Caribe y se pretende que sean lo más representativos posibles para la metodología.

De la tesis se tomaron los datos de profundidad del agua (Ver figura 15), las características de la plataforma de perforación y las condiciones climatológicas para los Casos A Y B.

Para efectos ilustrativos de la metodología, el tipo de lodo de perforación para los casos A y B en la fase inicial del pozo es un lodo base agua (agua de mar y bentonita). Para la segunda fase del Caso A se aplica un lodo base agua más aditivos para control mecánico. Para el Caso B se aplica un lodo base sintética que se desarrolle adecuadamente en las condiciones de presión y temperatura presentes a la profundidad del pozo. No se considera la opción de un lodo base aceite para ninguno de los casos debido a su contenido de material altamente tóxico y a que el tratamiento para un lodo base sintética es muy similar.

FIGURA 15. Profundidad del agua para el Caso A y Caso B



FUENTE: ACERO, J.R., CARO, D.Y. Tesis de grado.

La profundidad de la perforación para el caso A (6.000 pies) se tomó a partir de datos de profundidad de pozos perforados en el campo Chuchupa³³. Para el caso B se tomó la profundidad de perforación registrada en la tesis, 11.000 pies.

Los datos de distancia a la costa son arbitrarios pero dentro del rango del bloque que está en estudio. El bloque se extiende 60 km aguas adentro del Caribe colombiano³⁴. Para el caso A se tomó una distancia de 10 km y para el caso B de 50 km.

Las condiciones climatológicas³² para los dos casos son muy similares. Estas son:

- Se presenta una época seca y otra de lluvias, esta última comprende los meses de junio a noviembre, esta caracterizada por precipitaciones que alcanzan los 125 mm y tormentas eléctricas que generalmente se presentan durante 40 días.
- Las condiciones son buenas para realizar operaciones aéreas en la mayor parte del año entre las primeras horas de la mañana y las 07:00 p.m. Hacia el mes de junio se presenta una notable disminución del brillo solar especialmente en las últimas horas del día, recortando así la hora final propicia para sobrevuelos a las 06:00 p.m.
- Se determinan cuatro épocas bajo condiciones normales de vientos divididas en trimestres. En el primer trimestre, de diciembre a febrero se registra la época de presencia de vientos más fuertes con un valor máximo de 16.8 m/s. La dirección predominante durante todo el año es nor-este.
- La altura promedio de las olas está entre 1.5 metros y 2 metros, con valores máximos de casi 6 metros en dirección noreste.
- El trimestre que brinda las condiciones menos propicias para los trabajos de perforación está comprendido por los meses de junio, julio y agosto.
- El valor máximo de la velocidad de las corrientes durante el año es de 5 nudos.

- La probabilidad de tormentas para el Caribe colombiano es de 0.33%, debido a la cercanía de la Sierra Nevada de Santa Marta que actúa como una barrera disipadora de estos fenómenos naturales.

7.1 CASO A

Criterios de selección.

Tipo de lodo. Lodo base agua y lodo base agua + aditivos para control mecánico.

Profundidad del agua	2.000 pies
Profundidad de la perforación	6.000 pies
Distancia a la costa	10 Km

Características del equipo de perforación. Unidad semi-sumergible de tercera generación con anclaje convencional. El espacio en la plataforma es suficiente para el sistema de control de sólidos y para la implementación de cualquiera de las tres opciones de disposición.

Condiciones climatológicas. Las condiciones climatológicas en el Caribe colombiano son propicias, la mayor parte del año, para las operaciones de perforación y de manejo de desechos.

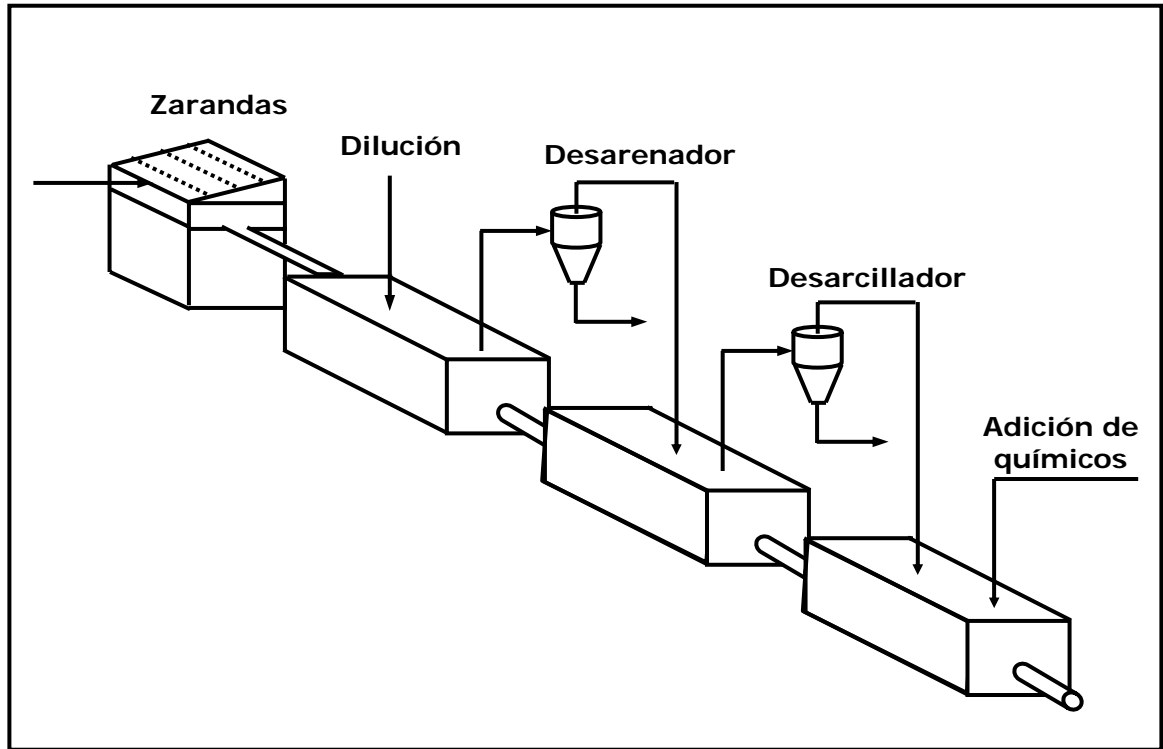
Consideraciones ambientales. La naturaleza del lodo seleccionado indica que su potencial de impacto en el medio marino es mínimo debido a que no contiene materiales altamente tóxicos. Los aditivos deben ser estudiados y escoger los que presenten menor riesgo ambiental a la hora de descargar.

Factor económico. La perforación con lodos base agua tiene un costo moderado. La descarga de cortes y lodo asociado se puede realizar en el mar previo tratamiento para eliminar los aditivos. El costo promedio de la descarga es de US\$ 45 por barril.¹⁰

7.1.1 Proceso de tratamiento a los desechos de perforación. Para la fase inicial de perforación se utiliza lodo base agua. Esto genera cortes de perforación y lodo contaminado. Como el costo de los componentes del lodo es bajo, resulta viable su disposición sin mayor tratamiento, cuando se haga necesario. Al utilizar el lodo con los aditivos se debe tener cuidado especial para poder reutilizar los químicos y desechar la mínima cantidad de ellos, debido a su costo y a que son más contaminantes para el medio ambiente.

Control de sólidos. Una típica conformación de equipos para el control de sólidos (ver Figura 16), cuando se trabaja con lodo base agua, es la siguiente: una zaranda vibratoria (*shale shaker*) de malla gruesa seguidas por dos zarandas de malla cada vez más fina (*fine screen shaker*), un desarenador (*desander*) y un desarcillador (*desilter*). Estos equipos permiten separar los sólidos del lodo, entregan una corriente de lodo activa para reutilización y una corriente de cortes y lodo asociado para disposición. De la eficiencia de los equipos y su mantenimiento depende el éxito de las operaciones de control de sólidos lo que representa un ahorro significativo en los componentes del lodo.

FIGURA 16. Diagrama del sistema de control de sólidos para WBM. Caso A



7.1.2 Opción de disposición. Después de aplicar el control de sólidos al lodo que sale del pozo, resulta una corriente de desecho conformada por cortes de perforación de diferentes tamaños y lodo adherido. El lodo contenido en los cortes depende de la eficiencia del sistema control de sólidos y de los requerimientos de la opción de disposición que se aplique.

Para este caso, **la descarga** directa en el mar se perfila como la opción más viable, teniendo en cuenta que se trabaja con lodo base agua (presenta los niveles más bajos de impacto al medio). Los 10 km de distancia a la costa hace que se descarte la idea de llevar los cortes a

tierra para disposición, debido a los altos costos de transporte de materiales de desecho.

La descarga es una opción económica, que no implica ningún proceso extra y que no requiere equipos adicionales a los encontrados en una plataforma convencional. Debe hacerse a través de un tubo ubicado a 2 pies por debajo de la superficie o a 4 pies por encima del fondo marino. Para la profundidad de agua considerada (2.000 pies), la segunda opción requiere un tubo de descarga muy largo, por lo tanto se toma la primera opción. La velocidad de asentamiento de las partículas depende de su tamaño y de las corrientes submarinas. Al realizarse la descarga desde la superficie, las partículas descargadas generarán un patrón de asentamiento mayor en área y menor en espesor, al que se formaría si se descargara cerca del fondo del mar. Como los constituyentes de la descarga son esencialmente fragmentos de roca de las formaciones perforadas, se espera que su asentamiento en el fondo del mar no provoque un impacto negativo para las especies submarinas. Sin embargo, es necesario realizar monitoreo del fondo del mar para determinar y evaluar el grado de afectación de la descarga.

7.2 CASO B

Criterios de selección.

Tipo de lodo. Lodo base agua para la sección inicial y un lodo base sintética para la parte profunda.

Profundidad del agua 6.500 pies

Profundidad de la perforación 11.000 pies

Distancia a la costa

50 Km

Características del equipo de perforación. Barco perforador con posicionadores dinámicos. Presenta alta movilidad y gran capacidad de almacenamiento. Cuenta con suficiente espacio para el equipo de control de sólidos.

Condiciones climatológicas. El régimen de oleaje en esta ubicación es un poco más alto que para el caso A. Situación que no alcanza a afectar las operaciones de perforación desde el tipo de unidad utilizado (barco perforador). Los demás factores climatológicos son muy similares para los dos casos.

Consideraciones ambientales. El lodo base sintética presenta niveles bajos de toxicidad para el agua, sin embargo no es recomendable descargarlo debido a su alto costo. Este tipo de lodo ha sido desarrollado para proporcionar suficiencia técnica en situaciones de perforación complejas, donde termina el rango de operación de los lodos base agua, y, a su vez para reducir la utilización de lodos base aceite.

Factor económico. Los lodos base sintética son generalmente costosos, pero ofrecen mejor rendimiento, reducen los tiempos de perforación, aumentan la tasa de penetración, no se degradan en condiciones de alta temperatura y presión. Al final, estos factores reduce el costo total de perforación mostrando la alta eficiencia de los sistemas base sintética.

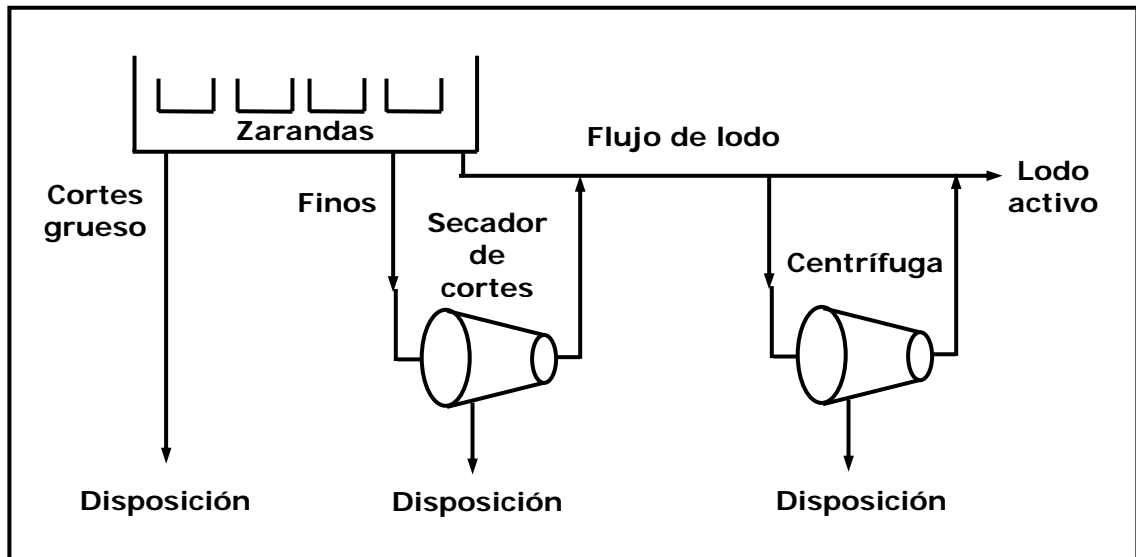
7.2.1 Proceso de tratamiento a los desechos de perforación.

Cuando se trabaja con lodos base sintética es primordial la recuperación de la mayor cantidad posible de lodo por medio del sistema de control de sólidos.

Control de sólidos. Debido al alto costo del lodo sintético se debe optimizar el control de sólidos para minimizar la pérdida de fluido base adherido a los cortes. El sistema de control de sólidos cuando se trabaja con lodo sintético (Ver Figura 17) consta de: una serie de zarandas vibratorias cuya malla disminuya gradualmente para retirar progresivamente los cortes de mayor tamaño, y un limpialodos (*mud cleaner*). Luego, los sólidos parcialmente secos se pasan por un secador de cortes (*cutting dryer*) para recuperar una cantidad de fluido sintético adicional. También, se puede utilizar una centrífuga para remover partículas que contribuyan con el aumento de finos, aunque para lodos sintéticos este aumento no es tan significativo como para lodos base agua.

7.2.2 Opción de disposición. Después de realizar el minucioso control de sólidos, la cantidad de fluido base en los cortes es mínima. Aunque el contenido de agentes tóxicos es bajo no es recomendable descargar al mar una cantidad muy grande de cortes que pueda afectar a largo plazo el desarrollo de la vida marina. La distancia a la costa de 50 km hace poco económica la opción de llevar a tierra los cortes para su disposición. Por lo tanto, la opción es **la reinyección** de cortes.

FIGURA 17. Diagrama del sistema de control de sólidos para SBM. Caso B



Implementar la opción requiere del equipo especial para tratar los cortes antes de ser inyectados y un pozo con las características óptimas, mostrados en el capítulo 4.

La reinyección de cortes resulta ser más costosa y dispendiosa en comparación con la descarga. Pero, como se cuenta con un barco perforador con gran capacidad de almacenamiento y movilidad, y un sistema de lodo que permite agilizar las operaciones de perforación y por consiguiente reducir el tiempo de trabajo, el costo extra se compensa.

Establecer la reinyección como método de disposición de cortes de perforación y lodos adheridos para la zona del mar Caribe colombiano ofrece el grado más alto de seguridad al medio ambiente, que debe ser, por supuesto, la principal preocupación.

8 CONCLUSIONES

- La necesidad de mantener en buen estado el medio ambiente afectado por las operaciones de exploración y producción de hidrocarburos, es la tarea que amerita el mayor esfuerzo por parte de las entidades involucradas.
- Los lodos base sintética son los que ofrecen las mejores garantías ambientales. Pero considerando su costo, la mejor estrategia para utilizar un tipo de lodo eficiente y más económico es el control al momento de realizar las descargas de desechos.
- En las operaciones de perforación, el lodo que retorna con cortes de roca y derrumbes del pozo, es sometido a un proceso de control de sólidos, en el que se intenta recobrar la máxima cantidad posible de lodo contenido en los cortes y dejar preparados los residuos resultantes para aplicarles un tipo de mecanismo de disposición.
- El control de sólidos es el único tratamiento que se realiza a los cortes de perforación en costa afuera. Depende principalmente del tipo de lodo usado, la formación a perforar, el equipo disponible en la plataforma, y los requerimientos específicos para la opción de disposición.

- La opción de disposición más utilizada en perforaciones costa afuera es la descarga al mar debido a sus ventajas técnicas, económicas y ambientales.
- El costo de la reinyección de cortes se incrementa debido a los requerimientos de equipo y mano de obra, pero se perfila como una opción viable debido a que reduce costos en aspectos como transporte y presenta las mejores características ambientales.
- Establecer y cumplir cabalmente las normas ambientales concernientes a la descarga de desechos de perforación en aguas marinas es una obligación que se debe compartir entre los gobiernos y las compañías petroleras.
- Las normas y límites deben establecerse de acuerdo a las características de los elementos que se descargan o se disponen y a las condiciones del ecosistema que resulte afectado.

9 RECOMENDACIONES

- Para implementar el manejo de los desechos de perforación que se generarán cuando se inicie la fase de exploración y desarrollo en el prospecto del mar Caribe colombiano, será necesario contar con los datos obtenidos en la caracterización geológica en desarrollo para definir precisamente los tipos de residuos y de esta manera realizar una planeación acertada.
- Hacer un estudio detallado del impacto ambiental generado por la presencia de los constituyentes de los desechos de perforación en el ecosistema del Caribe colombiano con especies representativas, para determinar límites de tolerancia.
- Establecer políticas claras de regulación ambiental con respecto a las operaciones de la industria de los hidrocarburos en zonas costa afuera.
- Es de vital importancia el control periódico de las operaciones realizadas en el mar y el monitoreo del ambiente marino para establecer las opciones que presenten mejor desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BLEIER R., LEUTERMAN A. Drilling fluids. Making peace with the environment. SPE Technical Conference, Washington. SPE 24553. 1993.
2. DEGOUY, D and LECOURTIER, J. Design of Environmentally Safe Drilling Fluids: Tests Under Actual Bottomhole Conditions in an Original Flow Loop. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 23063. 1991.
3. WILLSON M. S. and DRISCOLL P. Drilling Salt Formations Offshore With Sea Water Can Significantly Reduce Well Costs. Dallas: IADC/SPE Drilling Conference. SPE 87216. 2004.
4. OORT E. V., RIPLEY D, et al. Silicate-Based Drilling Fluids: Competent, Cost-effective and Benign Solutions to Wellbore Stability Problems. IADC/SPE Drilling Conference held in New Orleans. SPE 35059. 1996.
5. MEINHOLD, A. Framework for a Comparative Environmental Assessment of Drilling Fluids Used Offshore. Brookhaven National Laboratory. Texas. SPE 52746. 1999.

6. OAKLEY D.J., HALLIDAY G., et al. New Oil-Based Drilling Fluid Reduces Oil on Cuttings. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 26698.1993.
7. BURKE C.J. and VEIL J.A. Synthetic Drilling Muds: Environmental Gain Deserves. Argonne National Laboratory. SPE 29737. 1995.
8. LEGENDRE ZEVALLOS M., CANDLER J., et al. Synthetic- Based Fluids in Deepwater Locations Enhance Environmental and Drilling Performance. SPE 35329. 1996.
9. GUILLERME M.,TOZZOLINO P. Water Discharges at Sea: How to Estimate Their Real Impact? Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 37871. 1997.
10. EPA. Statistical Analyses Supporting Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category. 2000 EPA-821-B-00-013 (2).
11. CLINE J.T., PIPER W.A. Drilling Waste Controls. Amoco Production Co. SPE 27162. 1994.
12. BECARIA J. A., MARTINEZ C. E. Tratamientos de Ripios Producto de la Perforación con Lodos Base Aceite. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 1997.

13. OGP. Reporte No. 2.58/156. OGP- Exploration and Production (E&P) Waste Management Guidelines. 1993.
14. IMCO. Tecnología Aplicada de Lodos. 1979.
15. OGP. Reporte No. 342. Environmental Aspects of the Use and Disposal of Non Aqueous Drilling Fluids Associated with Offshore Oil & Gas Operations. Association of Oil and Gas Producer, OGP. 2003.
16. SHAW G., SLATER B. Removing Oil from Drill Cuttings – An Offshore Solution-. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 19242. 1989.
17. LIMIA, J. Silica Micro-encapsulation: A Technology for the Elimination of the Environmental Impact of Cutting Discharges. Baker Hughes INTEQ. SPE 52747. 1999.
18. OGP. Report N° 2.84/329. Oil and Gas Exploration and Production in Artic Offshore Regions. Guidelines for Environmental Protection. Association of Oil and Gas Producer, OGP. 2002.
19. ANL. Potential Environmental Benefits from Regulatory Considerations of Synthetic Drilling Muds. Argonne National Laboratory. U.S. Department of Energy. 1995.
20. CIN. A User Guide for Evaluation of Chemicals Used and Discharged Offshore. User Guide Version 1.3. 2004.

21. KUNZE, K., SKORVE, H. Merits of Suspending the First Platform Well as a Cuttings Injector. SPE Technical Conference, Dallas, Texas. 2000.
22. BRUNO M.S., QIAN H.X. Economic Disposal of Solid Oilfield Wastes. E & P Exchange. 1995. SPE 30968.
23. UNEP Technical Publication. Environmental management in oil and gas exploration and production. United Nations Environment Programme UNEP. 1997.
24. OSPAR Convention. Convention for Protection of Marine Environment of North-East Atlantic. Disponible en Internet en <http://www.offshore-environment.com/ospar.html>
25. EPA. Office of Compliance Sector Notebook Project Profile of the Oil and Gas Extraction Industry. 2000. Disponible en Internet en <http://www.epa.gov/oeca/sector>
26. EPA. National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES). 2004. Disponible en Internet en <http://cfpub.epa.gov/npdes/npdesreg.cfm>
27. CFR. Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). November 18, 2004. Disponible en Internet en <http://ecfr.gpoaccess.gov>
28. MMS. Federal Regulations: Minerals Management Service. 2004. Disponible en Internet en <http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/federal/mms/index.cfm>

29. DIMAR. Portal Marítimo Colombiano. Protección del Medio Marino y Costero. Disponible en Internet en <http://www.dimar.mil.co>
30. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Medio Ambiente. Competencia y Regulación. 2004. Disponible en Internet en http://compreg.uniandes.edu.co/modulos/6_ma/02.htm
31. MINISTERIO DEL INTERIOR. Programa Presidencial de Lucha Contra la Corrupción. 2004. Disponible en Internet en <http://www.anticorrupcion.gov.co/mininterior/dnpad/index.htm>
32. ACERO, J.R., CARO, D.Y. Análisis de la posible unidad de perforación a emplearse en el prospecto Bahía en el Caribe costa afuera. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2004
33. HUANG, W.S., FRENCH M. Design and Performance of Chuchupa 14 – First Horizontal Gas Well, Offshore Colombia. International Meeting on Petroleum Engineering. China. SPE 29978. 1995.
34. ECOPETROL. Carta Petrolera. Edición 108 abril-mayo 2004.

BIBLIOGRAFÍA

ACERO, J.R., CARO, D.Y. Análisis de la posible unidad de perforación a emplearse en el prospecto Bahía en el Caribe costa afuera. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2004.

ANL. Potential Environmental Benefits from Regulatory Considerations of Synthetic Drilling Muds. Argonne National Laboratory. U.S. Department of Energy. 1995.

BECARIA J. A., MARTINEZ C. E. Tratamientos de Ripios Producto de la Perforación con Lodos Base Aceite. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 1997.

BLEIER R., LEUTERMAN A. Drilling fluids. Making peace with the environment. SPE Technical Conference, Washington. SPE 24553. 1993.
BRUNO M.S., QIAN H.X. Economic Disposal of Solid Oilfield Wastes. E & P Exchange. 1995. SPE 30968.

BURKE C.J. and VEIL J.A. Synthetic Drilling Muds: Environmental Gain Deserves. Argonne National Laboratory. SPE 29737. 1995.

CFR. Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). November 18, 2004. Disponible en Internet en <http://ecfr.gpoaccess.gov>

CIN. A User Guide for Evaluation of Chemicals Used and Discharged Offshore. User Guide Version 1.3. 2004.

CLINE J.T., PIPER W.A. Drilling Waste Controls. Amoco Production Co. SPE 27162. 1994.

DEGOUY, D and LECOURTIER, J. Design of Environmentally Safe Drilling Fluids: Tests Under Actual Bottomhole Conditions in an Original Flow Loop. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 23063. 1991.

DIMAR. Portal Marítimo Colombiano. Protección del Medio Marino y Costero. Disponible en Internet en <http://www.dimar.mil.co>

ECOPETROL. Carta Petrolera. Edición 108 abril-mayo 2004.

EPA. National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES). 2004. Disponible en Internet en <http://cfpub.epa.gov/npdes/npdesreg.cfm>

----- Office of Compliance Sector Notebook Project Profile of the Oil and Gas Extraction Industry. 2000. Disponible en Internet en <http://www.epa.gov/oeca/sector>

----- Statistical Analyses Supporting Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category. 2000 EPA-821-B-00-013 (2).

GUILLERME M., TOZZOLINO P. Water Discharges at Sea: How to Estimate Their Real Impact? Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 37871. 1997.

HUANG, W.S., FRENCH M. Design and Performance of Chuchupa 14 – First Horizontal Gas Well, Offshore Colombia. International Meeting on Petroleum Engineering. China. SPE 29978. 1995.

IMCO. Tecnología Aplicada de Lodos. 1979.

KUNZE, K., SKORVE, H. Merits of Suspending the First Platform Well as a Cuttings Injector. SPE Technical Conference, Dallas, Texas. 2000.

LEGENDRE ZEVALLOS M., CANDLER J., et al. Synthetic- Based Fluids in Deepwater Locations Enhance Environmental and Drilling Performance. SPE 35329. 1996.

LIMIA, J. Silica Micro-encapsulation: A Technology for the Elimination of the Environmental Impact of Cutting Discharges. Baker Hughes INTEQ. SPE 52747. 1999.

MEINHOLD, A. Framework for a Comparative Environmental Assessment of Drilling Fluids Used Offshore. Brookhaven National Laboratory. Texas. SPE 52746. 1999.

MINISTERIO DEL INTERIOR. Programa Presidencial de Lucha Contra la Corrupción. 2004. Disponible en Internet en <http://www.anticorruccion.gov.co/mininterior/dnpad/index.htm>

MMS. Federal Regulations: Minerals Management Service. 2004.
Disponible en Internet en
<http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/federal/mms/index.cfm>

OAKLEY D.J., HALLIDAY G., et al. New Oil-Based Drilling Fluid Reduces Oil on Cuttings. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 26698.1993.

OGP. Report N° 2.84/329. Oil and Gas Exploration and Production in Arctic Offshore Regions. Guidelines for Environmental Protection. Association of Oil and Gas Producer, OGP. 2002.

----- Reporte No. 2.58/156. OGP- Exploration and Production (E&P) Waste Management Guidelines. 1993.

----- Reporte No. 342. Environmental Aspects of the Use and Disposal of Non Aqueous Drilling Fluids Associated with Offshore Oil & Gas Operations. Association of Oil and Gas Producer, OGP. 2003.

OORT E. V., RIPLEY D, et al. Silicate-Based Drilling Fluids: Competent, Cost-effective and Benign Solutions to Wellbore Stability Problems. IADC/SPE Drilling Conference held in New Orleans. SPE 35059. 1996.

OSPAR Convention. Convention for Protection of Marine Environment of North-East Atlantic. Disponible en Internet en <http://www.offshore-environment.com/ospar.html>

SHAW G., SLATER B. Removing Oil from Drill Cuttings – An Offshore Solution-. Offshore European Conference held in Aberdeen. SPE 19242. 1989.

UNEP Technical Publication. Environmental management in oil and gas exploration and production. United Nations Environment Programme UNEP. 1997.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Medio Ambiente. Competencia y Regulación. 2004. Disponible en Internet en http://compreg.uniandes.edu.co/modulos/6_ma/02.htm

WILLSON M. S. and DRISCOLL P. Drilling Salt Formations Offshore With Sea Water Can Significantly Reduce Well Costs. Dallas: IADC/SPE Drilling Conference. SPE 87216. 2004.