


	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, Abril 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):





Andres Felipe Gaspar Reyes, con C.C. No.1.075.271.474, Carlos Andres Portilla Hernández, con C.C. No. 1.085.295.307, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado__ FORMULACIÓN DE UN LODO DE PERFORACIÓN 100 % BASE ACEITE, AMBIENTALMENTE AMIGABLE MEDIANTE EL USO DE UN ACEITE VEGETAL (HIGUERILLA). presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de INGENIERIO DE PETRÓLEOS; autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE::



Firma: _____





CARLOS ANDRES PORTILLA H.

EL AUTOR/ESTUDIANTE



Firma: _____

ANDRES FELIPE GASPAR REYES

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: FORMULACION DE UN LODO 100%BASE ACEITE AMBIENTALMENTE AMIGABLE MEDIANTE EL USO DE UN ACEITE VEGETAL (HIGUERILLA).

AUTOR O AUTORES: ANDRES FELIPE GASPAR REYES, CARLOS ANDRES PORTILLA HERNANDEZ, CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS.

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gaspar Reyes	Andres Felipe
Portilla Hernández	Carlos Andres

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Vargas Castellanos	Constanza

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO DE PETRÓLEOS.





FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016

NÚMERO DE PÁGINAS: 196

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X Grabados ___ Láminas ___
 Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: NO

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (Meritoria)

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Aceite de ricino	Castor Oil
2. Impacto ambiental	Enviromental impact
3. Floculación	Flocculation
4. Saponificación	Saponification
5. Tiempo de rolado	Rolling time.

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Con el objetivo de minimizar el impacto ambiental en las operaciones de perforación petrolera, la investigación se encamina al estudio de un lodo 100% base aceite a partir del óleo proveniente de la semilla de higuierilla comúnmente usada en múltiples aplicaciones industriales y con gran versatilidad climatológica. El presente trabajo muestra las razones por las cuales se puede usufructuar las propiedades del fluido e incorporarlas en las múltiples ventajas que tiene un lodo base aceite. Para ello se realiza un análisis técnico basado en la norma API 13B-2, un análisis ambiental mediante el seguimiento de supervivencia a una planta de frijol contaminada con el lodo y un análisis económico de las posibles ideas de negocio que pueden hacer el aceite más rentable en Colombia.

Las propiedades reológicas se hallan a temperaturas de 65, 80 y 120 °C con el fin de evaluar su reacción a condiciones elevadas, además se estudia el comportamiento del fluido al ser contaminado con sólidos, agua y cemento y por último se realiza una comparación entre el diésel, aceite más usado en los lodos de perforación; la palma, cultivo que incursiona con éxito actualmente en Colombia y la higuierilla cuya propuesta se presenta en este proyecto.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

3 de 3

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The objective here is to minimize the environmental impact of drilling operations; the research is oriented to study a 100% oil base mud from oil of the higuierilla seeds, which is commonly used in many industrial applications and with climatological versatility. This paper shows the reasons why can take advantage of fluid properties and incorporate them into the multiple advantages of an oil-base mud. For this a technical analysis was done based on the standard API 13 B-2, an environmental analysis by monitoring survival a bean plant contaminated with the mud and an economic analysis of potential business ideas that can make the most profitable oil in Colombia.

The rheological properties are measures at 65, 80 and 120°C, to evaluate the reaction to high conditions of temperature, additionally analyses the fluid behavior in the presence of contaminants such as Solids, water and cement, finally a comparison between the diesel, the palm oil and Higuierilla, which the proposal is presented in this paper.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Costanza Vargas Castellanos

Costanza Vargas Castellanos

Firma:

Nombre Jurado: Luis Fernando Bonilla

Firma: *Luis Fernando Bonilla*

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma: *Luis Humberto Orduz*



Universidad Surcolombiana



**FORMULACIÓN DE UN LODO DE PERFORACIÓN 100 % BASE ACEITE,
AMBIENTALMENTE AMIGABLE MEDIANTE EL USO DE UN ACEITE
VEGETAL (HIGUERILLA).**



**ANDRES FELIPE GASPAR REYES
CARLOS ANDRES PORTILLA HERNANDEZ**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA 2016**



Universidad Surcolombiana



**FORMULACIÓN DE UN LODO DE PERFORACIÓN 100 % BASE ACEITE,
AMBIENTALMENTE AMIGABLE MEDIANTE EL USO DE UN ACEITE
VEGETAL (HIGUERILLA).**



**ANDRES FELIPE GASPAR REYES
CARLOS ANDRES PORTILLA HERNANDEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al título de
Ingeniero de Petróleos

Director.
Ms. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS
Ingeniera de Petróleos

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA 2016**



AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser el precursor de todos mis objetivos, de todas mis metas. Por hacer de este sueño una realidad, esa realidad que sin sacrificios no podría llevarse con orgullo. A toda mi familia por su apoyo incondicional, en especial mi madre Lilia Reyes García, luchadora incansable que se propuso hasta el final llevar a sus hijos a ser profesionales, entiéndase profesional la unión de la disciplina y los valores inculcados en casa. A mi profesora y directora de este proyecto Constanza Vargas castellanos mil y mil gracias por su dedicación, enseñanzas y sobre todo por creer en nosotros. A mi amigo y compañero de tesis Carlos Andrés Portilla Hernández, a quien doy fe le esperan muchos éxitos en su vida, fueron excelente experiencias, lecciones aprendidas y sobretodo el trabajo en equipo. A la empresa fluidos y servicios por hacer parte de este proyecto, por brindarnos el apoyo en todos los sentidos. A todos mis amigos de lucha por ser los mejores, porque de cada uno aprendí cosas buenas. Nata, vane, Milena, cesar, julio, Fernando, paula, óscar, Andreita y demás. Espero verlos en la cúspide con la humildad que debe caracterizarnos. Por ultimo mi mención más grande, mi sobrina Lucianita Bahamon, a quien quiero con el alma y deseo el todo poderoso guie sus pasos hasta el final.

Andrés Felipe Gaspar reyes

Quiero dedicar este proyecto a Dios quien hizo posible todas las experiencias y esfuerzos que me hicieron crecer como persona y profesional. A mi papá Rafael Portilla Rubio por acompañarme y protegerme durante toda mi vida en todos los proyectos y dificultades que he tenido. A mi mamá Melania Hernández Revelo por llenarme de amor y fuerza para seguir adelante en cada obstáculo. A mi hermana Paola Portilla Hernández por ser mi ángel guardián en cada minuto de mi vida, llenándome de palabras de aliento cada vez que las necesitaba y aconsejándome en cada momento. A mi tía María Delicia Revelo por velar y siempre estar pendiente de mí. A mi profesora y directora de tesis Constanza Vargas Castellanos por ser nuestro soporte en cada decisión y cada paso que dimos en este proyecto, por su amabilidad y el tiempo que nos dedicó. A mi novia María Paula Gutiérrez por convertirse en un apoyo incondicional y ser parte de mi vida. A mi gran amigo y compañero de tesis Felipe Gaspar Reyes, gracias por tu compromiso con el proyecto, a quien le deseo los mejores éxitos personales y profesionales. A mis incomparables amigos de la Universidad con quienes compartí momentos inolvidables y me enseñaron mucho, siempre desearé lo mejor para ustedes. A la empresa fluidos y servicios por permitirnos realizar este gran proyecto y su acompañamiento en todos los sentidos. A mi Universidad y sus profesores que me brindaron su conocimiento y experiencia.

Carlos Andres Portilla Hernández



CONTENIDO:

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
4.	MARCO TEÓRICO.....	17
4.1.	FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	17
4.2.	PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	17
4.2.1.	Densidad.	18
4.2.2.	Reología.	18
4.2.3.	Resistividad.	22
4.2.4.	Alcalinidad y ph.	23
4.2.5.	Perdida de filtrado.	24
4.2.6.	Lubricidad.....	25
4.3.	TIPOS DE FLUIDOS	26
4.3.1.	Fluidos newtonianos.....	26
4.3.2.	Fluidos no newtonianos.....	27
4.4.	MODELOS REOLÓGICOS.....	32
4.5.	GENERALIDADES DE LOS FLUIDOS BASE ACEITE.....	37
4.6.	FORMULACIÓN DE UN LODO BASE ACEITE	39
4.7.	USOS DE UN LODO 100% BASE ACEITE	44
4.8.	DESVENTAJAS DE UN LODO BASE ACEITE.....	46
4.9.	CONTAMINACIÓN	48
4.9.1.	Problemas del control de sólidos	52
4.9.2.	Contaminación para los fluidos de perforación base aceite	55
4.10.	ACEITES VEGETALES.....	59
4.10.1.	Propiedades físicas de los aceites vegetales más importantes	61
4.10.2.	Extracción.	64
4.10.3.	Aceite de higuera.....	67
4.10.4.	Propiedades del aceite de higuera.....	67
4.11.	ACEITES VEGETALES USADOS EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	70
4.12.	PERDIDA DE FLUIDO	74



4.13.	CONSIDERACIONES AMBIENTALES	85
4.13.1.	Normatividad.....	87
4.13.2.	Manejo de residuos.....	88
4.13.3.	Pruebas de toxicidad.....	88
4.13.4.	Técnicas de minimización de desechos	90
4.13.5.	Tratamiento y opciones de disposición.....	90
4.13.6.	Bioremediación	94
5.	DESARROLLO DEL PROYECTO	97
5.3.	SELECCIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN	97
5.4.	COSTOS DE LODO DE PERFORACIÓN.....	99
5.5.	SELECCIÓN DE UN FLUIDO BASE	100
5.6.	PLANEACIÓN DEL PROCESO DE AVANCE DEL PROYECTO.....	104
5.7.	EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO	106
6.	RESULTADOS	110
6.3.	EVALUACIÓN TÉCNICA.....	110
6.3.1.	Selección del fluido base aceite de higuera.....	110
6.3.2.	Proceso de formulación y resultados.....	114
6.4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	143
6.4.1.	Precio del aceite.....	143
6.4.2.	Casos evaluados.....	150
6.4.3.	Análisis económico.....	156
6.5.	COMPARACION ENTRE EL ACEITE DE HIGUERA, PALMA Y DIESEL ...	158
6.5.1.	Comparación ambiental.....	159
6.5.2.	Comparación reológica.....	162
6.5.3.	Comparación de densidad.....	168
6.5.4.	Comparación de estabilidad eléctrica	169
6.5.5.	Comparación en siembra y sostenimiento	169
7.	CONCLUSIONES.....	171
8.	RECOMENDACIONES.....	173
9.	BIBLIOGRAFÍA	175
	ANEXO A	181
	ANEXO B	192
	ANEXO C	196



LISTA DE TABLAS:

Tabla 1. Ejemplo Datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte (IMCO manual)	34
Tabla 2. Clasificación de los sólidos acuerdo al tamaño. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3. Contaminantes comunes y sus efectos en los fluidos de perforación.	51
Tabla 4. Clasificación de aceites vegetales	60
Tabla 5. Propiedades de los aceites vegetales.....	61
Tabla 6. Composición Aceite de Ricino	67
Tabla 7. Propiedades del Aceite de Higuierilla. Fuente: Organización SCIELO	68
Tabla 8. Aceites vegetales usados como fluidos base para lodos de perforación. .	70
Tabla 9. Información necesaria para casos de pérdida de circulación.....	81
Tabla 10. Materiales usados para pérdida de circulación.	82
Tabla 11. % wt de Cal requerida de acuerdo al contenido de aceite	93
Tabla 12. Formato evaluación económica.	100
Tabla 13. Propiedades del aceite de Higuierilla.....	110
Tabla 14. Propiedades de los aceites vegetales y Diesel.	111
Tabla 15. Resultado Evaluación aceite de Higuierilla	113
Tabla 16. Orden y tiempo de mezcla del proyecto.....	115
Tabla 17. Proceso de formulación de un fluido de perforación base aceite de higuierilla.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 18. Activadores Polares usados en el proyecto	117
Tabla 19. Propiedades OBM Higuierilla formulaciones envejecidas a 300 °F y 100 psi	120
Tabla 20. Resultados formulación 9 (Final)	120
Tabla 21. Aditivos y cantidades utilizadas para controlar filtrado en OBM de Higuierilla	121
Tabla 22. Formulación Optima OBM de Higuierilla 10 ppg.....	122



Tabla 23. Filtrado HTHP Diseño 10 ppg Lodo optimo.....	122
Tabla 24. Formulación y resultados OBM de Higuierilla Diseño 2 (9 ppg).....	123
Tabla 25. Resultados OBM Diseño 2. Envejecimiento.....	124
Tabla 26. Evaluación OBM Higuierilla Formulación optima Diseño 1	125
Tabla 27. OBM Higuierilla Prueba Contaminación con Sólidos	130
Tabla 28. Datos de abastecimiento de aceite de Higuierilla.	145
Tabla 29. Sensibilidades para el precio del aceite de Higuierilla	146
Tabla 30. Evaluación económica del OBM de Higuierilla	148
Tabla 31. Escenarios Precio/Bbl según sensibilidades en el aceite de Higuierilla.	148
Tabla 32. Evaluación Precio/Bbl de OBM de palma y Diesel con Formulación final.	149
Tabla 33. Estado Mecánico Pozo Caso 1.	150
Tabla 34. Volumen necesario para pozo caso 1.	151
Tabla 35. Propuesta de negocio de OBM de Higuierilla para caso 1.....	151
Tabla 36. Sensibilidades para la propuesta de negocio de OBM de Higuierilla para caso 1.	152
Tabla 37. Costos de perforación de un Pozo con OBM de Higuierilla.	152
Tabla 38. Especificaciones sección 12 1/4 “- Caso 2 de perforación.....	155
Tabla 39. . Costos por barril - propuesta de negocio de OBM de Higuierilla para caso 2.....	155
Tabla 40. Comparación económica de OBM Higuierilla, Palma y Diesel.....	158
Tabla 41. Prueba Toxicológica - Plantas de frijol.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 42. Formulación General (Optima).....	162
Tabla 43. Formulación y Reología Lodo de Palma	163
Tabla 44. Formulación y Reología Aceite de Higuierilla	163
Tabla 45. YS OBM de Palma e Higuierilla	165
Tabla 46. Reducción de viscosidad del aceite de higuierilla con metanol.	166
Tabla 47. Comparación de Densidades Aceites usados en el estudio.	168



LISTA DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1. Balanza de lodo – medición de Densidad.....	18
Ilustración 2. Embudo Marsh	19
Ilustración 3. Viscosímetro- Para medir: viscosidad plástica, punto cedente y la fuerza de gel.	22
Ilustración 4. Lubricity Taster [SPE-164049].....	25
Ilustración 5. Equipo SEM [SPE-164049]	25
Ilustración 6. Tensión de corte vs velocidad de corte para un fluido Newtoniano ..	26
Ilustración 7. Viscosidad vs esfuerzo de corte - FLUIDO NEWTONIANO	27
Ilustración 8. Comportamiento de fluido Newtoniano y fluidos No-Newtonianos independientes del tiempo.	29
Ilustración 9. Comportamiento Fluido Tixotrópico	30
<i>Ilustración 10. Gráfico de Datos Tabla 1</i>	<i>34</i>
Ilustración 11. Modelos Reológicos – Coordenadas rectangulares.	37
Ilustración 12. Acción del tamaño de las partículas sólidas en la viscosidad.....	50
Ilustración 13. Zaranda Vibratoria AWD (III) – ESVENCA9	54
Ilustración 14. Desarenador ESVENCA9.....	54
Ilustración 15. Estructura química del ácido oleico y glicerol.	59
Ilustración 16. Triglicéridos	60
Ilustración 17. Máquina extractora de aceite de higuera y jatropha.....	62
Ilustración 18. Cultivo de Palma Africana- Bella	62
Ilustración 19. Equipo de limpieza de semillas oleaginosas.	63
Ilustración 20. Expeller de tornillo	65
Ilustración 21. Proceso de extracción de aceite de Jatropha por solvente.	65
Ilustración 22. M.I. SWACO Diagrama Formaciones	75
Ilustración 23. Morfología de Litopenaeus setiferus y Litopenaeus vannamei.	89
Ilustración 24. BP DRILLING MANUAL. Alteración de la humectabilidad de una formación de arenisca arcillosa.....	98



Ilustración 25. Viscosímetro 800. OFITE.....	106
Ilustración 26. Termocopa graduada OFITE	106
Ilustración 27. Viscosímetro OFITE 77 HTHP	106
Ilustración 28. Filtroprensa HTHP- OFITE	107
Ilustración 29. Horno de envejecimiento OFITE.....	107
Ilustración 30. Celda de envejecimiento. OFITE	108
Ilustración 31. Balanza de lodos OFITE.....	108
Ilustración 32. Equipo de retorta OFITE.....	108
Ilustración 33. Medidor de estabilidad eléctrica OFITE.....	108
Ilustración 34. Mezcladora Hamilton Beach OFITE.	109
Ilustración 35. Parte elastómera - motor direccional- Sección de Potencia.....	110
Ilustración 36. Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel	112
Ilustración 37. Reograma aceite de Higuierilla.....	114
Ilustración 38. Viscosidades Plásticas diferentes formulaciones	118
Ilustración 39. Fluido de perforación base aceite de higuierilla.....	120
Ilustración 40. Filtrado OBM 30 mL Diseño 1.	124
Ilustración 41. Filtrado OBM 1,9 mL Diseño 1.	124
Ilustración 42. Reograma Lodo Óptimo. Diseño 1. 10 ppg OBM Higuierilla	127
Ilustración 43. Resultado OBM Higuierilla-Prueba de retorta	128
Ilustración 44. Reograma OBM Higuierilla Diseño 1 contaminado con sólidos.	130
Ilustración 45. Prueba de contaminación con agua no salina a OBM de Higuierilla (Diseño de 10 ppg).	131
Ilustración 46. Prueba de contaminación con agua no salina a OBM de Higuierilla (Diseño de 9 ppg).	132
Ilustración 47. Prueba de contaminación con Cemento a OBM de Higuierilla (Diseño de 10 ppg).....	133
Ilustración 48. Prueba de contaminación con Cemento OBM de Higuierilla (Diseño de 9 ppg).....	134



Ilustración 49. Decantación de sólidos debido a la contaminación con cemento diseño 2.	134
Ilustración 50. Prueba de envejecimiento y seguimiento durante 5 días.	135
Ilustración 51. Equipo OFITE 77. Viscosímetro HT-HP.	136
Ilustración 52. Prueba de compatibilidad OBM de Higuierilla y Fluido de confinamiento.....	137
Ilustración 53. Reograma con Viscosímetro HPHT OFI 77 – OBM Higuierilla.	138
Ilustración 54. Valores Reológicos OBM Higuierilla- OFITE 77.	138
Ilustración 55. Viscosidades a diferentes tasas de corte-OFITE 77 OBM Higuierilla	139
Ilustración 56. Reograma OBM 10 ppg Higuierilla optimo y aceite de Higuierilla. ...	140
Ilustración 57. Reograma OBM 9 ppg Higuierilla optimo y aceite de Higuierilla. ...	140
Ilustración 58. Data de entrada HIDRAULICA OBM higuierilla D1.	141
Ilustración 59. Cálculo de HIDRAULICA OBM higuierilla D1.	141
Ilustración 60. Data de entrada HIDRAULICA OBM higuierilla D2.	142
Ilustración 61. Cálculo de HIDRAULICA OBM higuierilla D2.	142
Ilustración 62. Diseño de Sarta para cálculo Hidráulico.	142
Ilustración 63. Comparación de precios aceites Palma, Diesel, WTI, Brent.	144
Ilustración 64. Esquema reducción de precios aceite de Higuierilla.	147
Ilustración 65. Estado Mecánico Pozo Caso 1.....	150
Ilustración 66. Estado Mecánico Pozo Caso 2.....	154
Ilustración 67. Prueba Toxicológica- Planta de frijol.	160
Ilustración 68. OBM de Palma con formulación General.	162
Ilustración 69. Fluido formulado con aceite Diesel.....	164
Ilustración 70. Reograma OBM Higuierilla y Plama	164
Ilustración 71. Comparación Viscosidades plásticas OBM de Higuierilla y Palma.	165
Ilustración 72. Perfiles de viscosidad Aceite de Higuierilla-Reducción de viscosidad con metanol.	167
Ilustración 73. Comparación YP OBM de Higuierilla y Palma.....	168





RESUMEN

TITULO: FORMULACIÓN DE UN LODO BASE ACEITE DISEÑADO PARA LA MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL MEDIANTE EL USO DEL ACEITE DE RICINO

AUTORES: Andrés Felipe Gaspar Reyes / Carlos Andrés Portilla Hernández.

PALABRAS CLAVE: Aceite de ricino, Impacto ambiental, Flocculación, saponificación, tiempo de rolado.

DESCRIPCIÓN:

El Diseño y manejo del fluido de perforación se considera como uno de los factores que más efectos tiene sobre el éxito o fracaso en las operaciones de perforación petrolera, no obstante, la formulación de dicho fluido se debe realizar teniendo en cuenta aspectos como: litología, condiciones del pozo, disponibilidad de materiales, entre otros. Durante los últimos años, la investigación se orienta a la formulación de lodos que además de cumplir con las especificaciones técnicas, disminuyan el impacto ambiental y el riesgo a la salud personal; buscando que los compuestos aromáticos, los desechos no biodegradables no constituyen un inminente peligro para el ecosistema.

La recopilación y estudio que se muestra en este documento está orientado a observar el comportamiento de un lodo base aceite de Higuierilla a diferentes condiciones de presión y temperatura buscando la formulación que cumpla con los requerimientos técnicos de la industria y a la vez hacer una primera valoración ambiental.

El análisis del comportamiento del fluido se diseña hasta los 120°C (248°F) para comparar los procesos de esterificación con los presentados en otras investigaciones usando otros tipos de aceites vegetales.



ABSTRACT

TITLE: FORMULATION OF AN OIL BASED DRILLING MUD DESIGN TO MINIMIZE THE ENVIRONMENTAL IMPACT BY USING OF CASTOR OIL.

AUTHORS: Andrés Felipe Gaspar Reyes / Carlos Andrés Portilla Hernández.

KEY WORDS: Castor oil, environmental impact, Flocculation, saponification, rolling time.

DESCRIPTION:

The drilling fluids are consider like one of the parameters which have a very important effects on the success or failure in oil drilling operations ,however , the formulation of this fluid should be made taking into account aspects such as lithology, well conditions, availability of materials, etc. Maybe today's one of the most important factors in oil based mud is the environmental issues. Some enterprises have been devoted to create a new kind of drilling muds that in addition to fulfilling the required specifications, reduce environmental impact and the risk for people health, as already know the oil based mud have a lot of aromatic content, plus considerable amount of non-biodegradable waste generated is an imminent danger to the ecosystem.

The researches and surveys conducted came up with possibilities of having environmentally friendly oil based mud. The objective of this study show the behavior of an oil based mud created from Higuierillas oil at different temperatures and pressures, in order to find a positive result to to the minimization of environmental impact if we compared this kind of mud with an mineral oil based mud, considering that higuierillas oil as a natural resource is abundant in Colombia and applying it to the formulation of a drilling fluid could be a new way for drilling.

The fluid behavior analysis is designed to 120 ° C (248 ° F) to compare esterification processes with some research using other types of vegetable oils



1. INTRODUCCIÓN

Los lodos base aceite a pesar de su excelente comportamiento inhibitor frente a las arcillas, no se utiliza con frecuencia en ciertos países por su elevado costo de formulación y el alto impacto ambiental.

En la actualidad se ha optado en las operaciones de perforación por utilizar los fluido de perforación base agua, y para contrarrestar las deficiencias que estos tienen se necesita el uso de químicos adicionales, como los inhibidores arcillas que son usados para evitar su hidratación y posterior hinchamiento. Para enfrentar las desventajas que presentan los lodos base aceite, mediante el uso de un aceite vegetal como fluido base, por su alto nivel de biodegradabilidad.

Los lodos base aceite son utilizados en pozos de alta profundidad, por esta razón deben aguantar grandes niveles de temperatura y presión, debido a lo anterior deben hacerse estudios del lodo formulado, estos estudios conciernen a pruebas de laboratorio como lo son: Densidad, Perdida de filtrado HTHP, pH, lubricidad, fuerza de gel, viscosidad, estabilidad eléctrica, Pom, entre otras. Con ello se tiene una idea del comportamiento del lodo a unas condiciones cercanas a las de pozo, siempre siguiendo las NORMAS API para obtener resultados correctos y correlacionales con estudios ya realizados en otros tipos de fluidos.

Se mostrará los resultados de las pruebas de los lodos envejecidos paso a paso en todo el proceso, teniendo en cuenta que se utilizó 3 tipos de aceite base (Palma, DIESEL y el aceite de higuera) para comparar sus resultados y obtener información de análisis. Se realizaron las mismas pruebas a los lodos formulados con estos tres fluidos, los aditivos y su cantidad se determinó haciendo pruebas únicamente con el aceite de higuera. Las cantidades y aditivos que mostraron mejor comportamiento se implementaron en el lodo base aceite de palma y DIESEL.



El objetivo principal de este estudio es encontrar una solución a un problema y destacar cada aspecto del proceso posible, incluyendo la extracción del aceite vegetal de la semilla de higuera, la formulación de lodo, las pruebas requeridas, la posible diferencia toxicológica que tienen los aceites vegetales y minerales, etc. Por último mostrar un beneficio adicional a un recurso natural y que al mismo tiempo persuada a la sociedad de que la industria petrolera Colombiana en conjunto con los futuros ingenieros de petróleos si se preocupan por el ecosistema tanto nacional como mundial queriendo mejorar los procesos de operación y al mismo tiempo velar por la preservación del medio ambiente.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Formular un lodo base aceite que presente características óptimas en su aplicación y reduzca significativamente el impacto ambiental.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar un fluido de perforación base aceite amigable al medio ambiente empleando la semilla de higuera.
- Proporcionar a la higuera (castor oil) un uso adicional mediante la creación de un fluido de perforación que al ser aplicado minimice la contaminación de los suelos.
- Determinar las propiedades reológicas del lodo base aceite de higuera y compararlo con los lodos a base de aceite diésel y de palma, teniendo en cuenta el factor económico y la seguridad ambiental.
- Verificar estándares operativos del fluido formulado al medir los parámetros básicos señalados por la norma API RP13B – 2, previo envejecimiento (Rolling up) del lodo formulado, a temperaturas entre los 65°C (150°F) y 120°C (250°F).
- Realizar las respectivas pruebas para un lodo base aceite sin contaminantes y un lodo contaminado con sólidos.



3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pregunta sobre la que se basará este proyecto de investigación es ¿cómo se puede minimizar el daño al medio ambiente en las operaciones de perforación cumpliendo con los requerimientos técnicos y de eficiencia necesarios?

La respuesta podría verse reflejada en el lodo que se usara para las operaciones de perforación, más específicamente en yacimientos donde el estrato productor está a una gran profundidad (depth > 5000ft). Generalmente para la perforación a gran escala se está utilizando lodos base aceite diésel, un aceite dañino para los suelos y para las formaciones perforadas, teniendo en cuenta lo anterior se probará un aceite vegetal que por sus propiedades naturales disminuirá este daño. Ahora el aceite vegetal se extraerá de una planta llamada higuera de nombre científico *Ricinus communis*. Esta semilla es globulosa, trilobulada, casi siempre cubierta por abundantes púas, que le dan un aspecto erizado; tiene tres cavidades, de superficie lisa y brillante. Se escogió esta semilla por la cantidad de aceite que puede brindar, el 55% de su totalidad es aceite así que el volumen no será difícil de obtener.

Para la obtención del aceite se recurrirá a ciertas empresas, reconocidas en el mercado por ser las mejores en extracción de aceites vegetales.

En cuanto a la prospección del proyecto, la obtención de la materia prima (semillas) es favorable en el país por dos razones: el primero, la higuera tiene la capacidad de adaptarse a casi todos los pisos térmicos, es decir a una gran variedad de climas, en algunos departamentos existen cultivos de ésta plantas para múltiples proyectos de aplicación ajenos a los fluidos de perforación, mientras que en otras regiones, la higuera hace parte de la flora silvestre que crece paulatinamente cerca de los ríos, arroyos y lagos. El segundo punto que se tiene a favor es la conservación de la planta; a raíz de que hace parte de la flora silvestre, no requiere de estricto cuidado para su preservación



4. MARCO TEÓRICO

4.1. FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación se componen de una fase sólida y una líquida, y en ciertos casos hay tipos de fluidos que poseen una fase gaseosa, dependiendo de la situación u operación en la que se requiera. El éxito o fracaso de las perforaciones de pozos petroleros depende en un gran porcentaje del fluido de perforación; ya que este debe cumplir todas las necesidades del pozo; controlar las presiones de las diversas formaciones, limpiar del hueco, entre otras funciones importantes. Sin embargo se debe tener en cuenta que este tipo de fluidos de perforación deben cumplir unas especificaciones técnicas y ser lo más económico posible, recordando siempre que esta industria es un negocio, y para que el negocio sea atractivo hacia los inversionistas, debe existir un equilibrio entre la parte financiera y la seguridad operacional (HSE).

Las funciones de un fluido de perforación son:

- Transporte y suspensión de los ripios o cortes generados durante la perforación.
- Enfriamiento y lubricación de la broca y la sarta de perforación.
- Control de presiones de formación.
- Mantenimiento de la estabilidad del pozo.
- Transmitir la potencia hidráulica a la broca.
- Evaluación de formaciones (toma de registros).
- Soporte del peso de la sarta de perforación
- Obturar las formaciones permeables.

4.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.



4.2.1. Densidad.

La densidad de un lodo es el peso por unidad de volumen y puede expresarse de diversas maneras: libras por pie cubico (pcf), peso específico (sg), kilogramos por metro cubico (Kg/m^3) y la más conocida libras por galón (lpg). La densidad también puede ser convertida a gradiente de densidad (presión por unidad de profundidad) en unidades de libra por pulgada cuadrada por pie (Psi/ft) o kiloPascales por metro (kP/m). Es de recordar que la densidad es uno de los dos factores que influyen directamente en la presión hidrostática de la columna de lodo.



Ilustración 1. Balanza de lodo – medición de Densidad

La densidad del lodo se mide utilizando una balanza de lodo, esta balanza consiste en una copa con su tapa, donde debe verterse la muestra del fluido y un brazo que sostiene dicha copa. Una cuchilla del brazo reposa sobre una base de apoyo. Una pesa corrediza sobre el brazo se acerca o se aleja de la cuchilla hasta balancear la tasa llena de lodo. La densidad se lee directamente.

4.2.2. Reología.

La medición de las propiedades reológicas de un lodo es importante tanto para calcular las pérdidas de presión por fricción, como la capacidad del lodo para elevar



los recortes y desprendimientos hasta la superficie, además se puede analizar la contaminación del fluido por sólidos, sustancias químicas y temperatura así como para determinar los cambios de presión en el interior del pozo durante el viaje. Entre las propiedades reológicas tenemos:

VISCOSIDAD

La viscosidad aparente o viscosidad Marsh, llamada así porque se utiliza un embudo Marsh, este mide la velocidad de flujo en un tiempo medido. La viscosidad de embudo es el número de segundos requerido para que $\frac{1}{4}$ de Galón de lodo pase a través de un tubo de $\frac{3}{16}$ de pulgada de diámetro, colocado a continuación de un embudo de 12 pulgadas de largo con capacidad de 1500 ml. El valor resultante es un indicador cualitativo de la viscosidad del lodo.

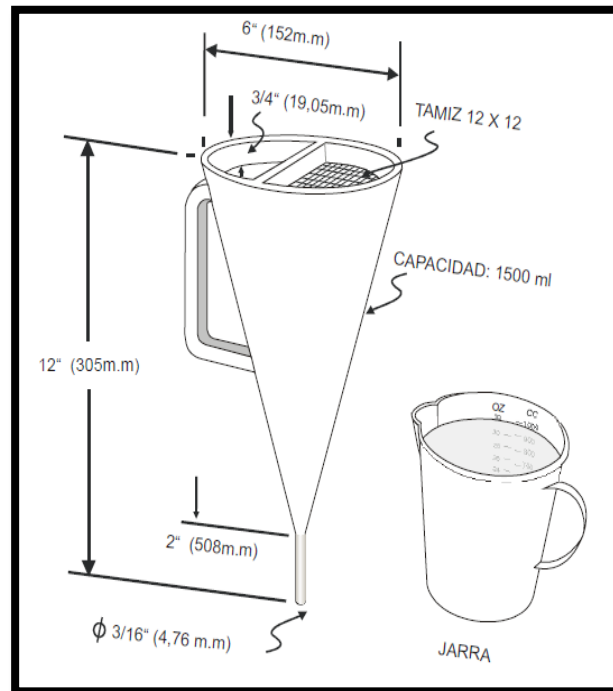


Ilustración 2. Embudo Marsh

La viscosidad Plástica (VP), es una medida absoluta de la resistencia al flujo del fluido, causada principalmente por la fricción de las partículas suspendidas y también la viscosidad de la parte fluida. La viscosidad plástica se expresa en



centipoise y esta es afectada por la concentración, tamaño y forma de las partículas sólidas suspendidas en el lodo.

Para encontrar el valor de la VP se utiliza un viscosímetro electrónico rotatorio de lectura directa y cilindros concéntricos, se realizan dos lecturas en el viscosímetro de VP y de punto cedente.

$$VP (cp) = \Theta 600 - \Theta 300 \quad (1)$$

PUNTO CEDENTE O YIELD POINT

Para el punto cedente se utilizan unidades de lb/100 ft², el YP es la parte de la resistencia al flujo, causada por las fuerzas de atracción entre partículas. Estas fuerzas atractivas son a su vez causadas por las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas dispersas en el lodo. Es muy importante tener en cuenta para esta propiedad el tipo de sólido, la concentración de éstos y la naturaleza iónica de las sales disueltas presentes en el fluido.

Es la propiedad que nos da la capacidad de transporte de los cortes de perforación. En un fluido No-Newtoniano se deberá ejercer una fuerza para iniciar el flujo y este será el punto cedente.

$$Yp (lb/100 ft^2) = \Theta 300 - VP \quad (2)$$

Los valores de Yp muy altos son probablemente el producto de sólidos reactivos provenientes de la formación o una cantidad excesiva de algún viscosificante, este tipo de problema puede llevar a un retraso en la perforación, debido a esto esta propiedad debe monitorearse siempre y tener claridad del procedimiento a seguir si se llega a tener un valor nocivo de Yield Point.

RESISTENCIA DE GELES

El viscosímetro también se usa para determinar las características tixotrópicas del lodo, es decir mide la capacidad de desarrollar estructuras de gel rígida o



semirrígida durante el periodo de reposo o “0” circulación, para esto se realizan dos mediciones de resistencia de gel a 10 segundos y a 10 minutos, respectivamente. Esta propiedad describe la capacidad de suspensión de los sólidos del lodo y cortes de perforación, esta propiedad es medida en lb/ft² o en Pa.

$$YS \text{ (lb/100ft}^2\text{)} = 2(\Theta_3) - \Theta_6 \text{ (3)}$$

El valor de YS (yield strength) da una aproximación numérica al comportamiento del lodo a bajas tasa de corte (espacio anular).

Las fuerzas de gel no deben ser muy bajas, ya que no podrían mantener eficientemente los ripios desprendidos durante las conexiones y los viajes de tubería. Si ésta es muy alta, la presión requerida para recircular el fluido puede fracturar la formación y favorecer las condiciones para una arremetida (Azar, J.J.; Lummus, J.L.1986). A continuación se presenta una clasificación de los tipos de geles:

- Geles frágiles poseen valores extremadamente bajos, donde los geles a los 10 segundos y a los 10 minutos son casi idénticos, por ejemplo 1/1, 2/2 y 2/3 etc.
- Geles favorables son aquellos que tienen valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos, por ejemplo 2/4, 3/6 y 4/8 etc.
- Geles progresivos tienen valores intermedios a los 10 segundos, luego se incrementan rápidamente hasta valores muy elevados a los 10 minutos por ejemplo 3/20, 6/35, 8/50.
- Los geles invariables o planos tienen valores casi idénticos a los 10 segundos y a los 10 minutos, sin embargo estos valores, en algunos casos pueden ser muy elevados, por ejemplo 11/12, 20/21, 30/32.

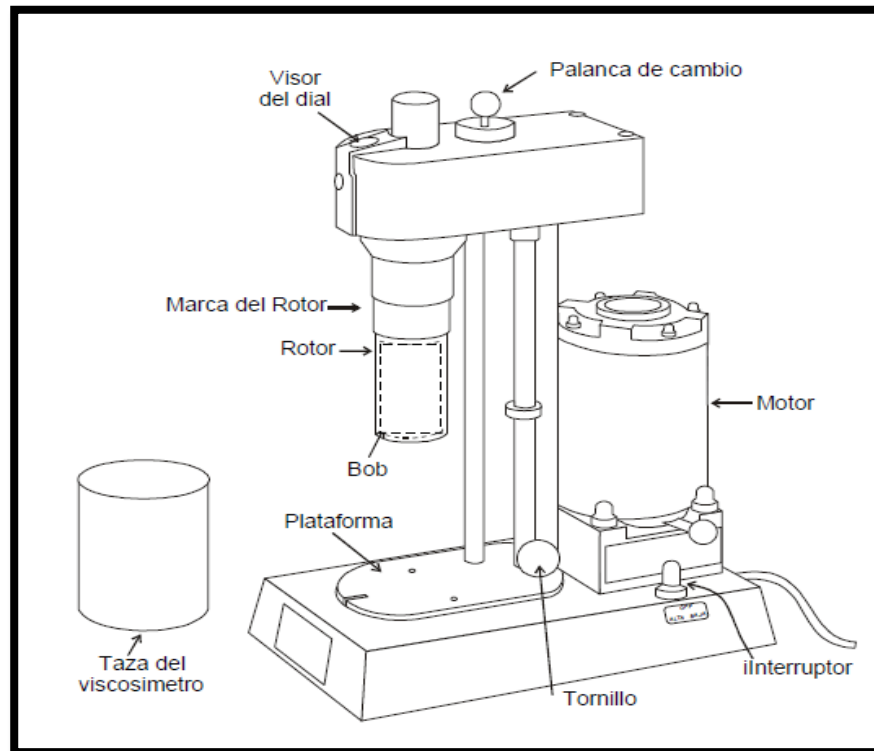


Ilustración 3. Viscosímetro- Para medir: viscosidad plástica, punto cedente y la fuerza de gel.

Tanto la resistencia de gel como el punto cedente son medidas de las fuerzas de atracción en un sistema de lodo. La resistencia de gel mide las fuerzas de atracción estáticas, mientras que el punto de cedencia (YP) mide las fuerzas de atracción dinámicas. El tratamiento para la resistencia de gel excesivamente alta es tratada de la misma manera que los lodos con altos puntos de cadencia. (Manual IMCO).

4.2.3. Resistividad.

Esta propiedad se refiere a la resistencia que tiene el fluido al paso de corriente eléctrica a través de él, esta propiedad es muy importante cuando se toman registros eléctricos de las formaciones perforadas.



Una evaluación apropiada de la formación es difícil si la fase líquida del lodo penetra profundamente en la formación o si el lodo ha erosionado el pozo física o químicamente (Tecnología aplicada de Lodos-IMCO).

Cuando se tienen fluidos de emulsión inversa esta propiedad es útil para conocer la estabilidad de la emulsión (estabilidad eléctrica).

En casos donde se está perforando con lodos base aceite, se torna difícil la interpretación de algunos registros eléctricos, ya que en algunos casos la diferencia de resistividad entre los fluidos de la formación y los de perforación es pequeña.

4.2.4. Alcalinidad y ph.

El pH indica la alcalinidad o acidez que pueda tener un fluido, en este caso de un lodo de perforación. En la escala de pH se tienen valores normales entre 1 a 14, siendo 7 un pH totalmente neutro, teniendo 1 como el valor más ácido y 14 el valor más básico, sin embargo habrán ocasiones en que se encontrará valores de acidez por debajo de 1. Los valores normales de un lodo de perforación en cuanto a su pH son 9.0, 9.5 o 10, aunque también encontramos lodos con pH más alto, por ejemplo lodos de 12.5 y 13. Mantener un valor básico de pH y no ácido ayuda a cuidar la tubería de la corrosión, preservar y activar los aditivos del lodo y por supuesto mantener las propiedades reológicas de éste.

Se debe tener mucho cuidado con los cambios que sufre el pH ya que ciertas formaciones como las evaporíticas, calcáreas o acuíferos cargados de sal pueden llegar a la floculación del lodo, por lo tanto ocurrirá una formación y sedimentación de partículas que afectara la reología.

Hay dos métodos para determinar el pH de los lodos. El primero es conocido como el método colorimétrico. Se basa en el efecto de la acidez y los álcalis en el color de ciertos indicadores químicos colocados sobre tiras de papel pH, el segundo es llamado electrométrico, se basa en el voltaje desarrollado entre dos electrodos



especiales (colocados en el mismo tubo vertical de vidrio). También se puede realizar una titulación y de esta manera se obtiene un resultado directo y más confiable que el método colorimétrico. La prueba “Pom” será descrita en este estudio en el ANEXO A (método para determinar alcalinidad en los lodos base aceite).

4.2.5. Perdida de filtrado.

Cuando se está perforando, el lodo tiende a crear una capa entre la sarta y la formación, sin embargo a través de esta capa llamada cake habrá un líquido que se filtrará a la formación, la velocidad con la que este líquido invade la formación y la cantidad de éste es lo que se denomina pérdida de fluido o de filtrado. Existen varios aspectos que influyen para que esta pérdida sea mayor o menor, como lo son: la permeabilidad de la formación, la diferencia entre la presión de poro y la presión hidrostática, y también por los aditivos (controladores de filtrado) que estén presentes en el lodo.

Existen dos métodos para medir la pérdida relativa de filtrado; la prueba API estándar y la prueba de HT-HP, en ambos métodos el lodo se coloca en una pequeña cámara que contiene un papel filtro en su parte inferior, la cámara es sellada herméticamente y se aplica una presión de un gas (CO_2) sobre el lodo, lo que empuja el filtrado a través del papel filtro. Después de 30 minutos se mide en una probeta graduada y se reporta el volumen del filtrado. Las diferencias entre los dos métodos son las condiciones de la prueba; la prueba API estándar se realiza a una presión de 100 psi y de temperatura ambiente, la prueba HT-HP se realiza generalmente a 300°F y 500 psi.

Es de esperar que en la prueba HT-HP el volumen del filtrado sea mayor debido a que las condiciones de Temperatura y Presión son bastante altas por lo tanto podría disminuir la eficacia de ciertos controladores de filtrado.



Luego de obtener el filtrado se le hace un estudio químico a éste para determinar la presencia de contaminantes, para ayudar al control de las propiedades del lodo, entre las pruebas q se realizan están:

- Alcalinidad.
- Concentración de sal (cloruros).
- Concentración de calcio.
- Concentración de yeso.

4.2.6. Lubricidad.

Esta propiedad permite que la fricción sea menor en cuanto al movimiento rotacional de la sarta y vertical del pozo (torque y arrastre), de esta manera la vida útil de la sarta y la broca aumentan.

Para evaluar la lubricidad se utiliza un equipo en el laboratorio llamado “lubricity taster”, que puede simular la rotación de la tubería bajo condiciones de presión a las que se encuentra sometido el pozo. Sin embargo existe otro equipo llamado “SEM” en donde se puede recrear condiciones de yacimiento, ambientes de núcleos del reservorio y también realizar las pruebas con las tuberías.



Ilustración 4. Lubricity Taster [SPE-164049]



Ilustración 5. Equipo SEM [SPE-164049]

4.3. TIPOS DE FLUIDOS

4.3.1. Fluidos newtonianos.

Cuando se habla de un fluido newtoniano, se dice que la proporcionalidad entre la tensión de corte y la velocidad de corte es directa. Por ejemplo, el agua es un fluido que se comporta de esta manera, al igual que el diésel.

Se puede afirmar que la viscosidad de los fluidos newtonianos es constante con respecto al tiempo, de esta manera este tipo de fluidos obedecen a la Ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = -\mu * \frac{dv_x}{dy} \quad (4)$$

Ahora al graficar el comportamiento de un fluido newtoniano obtendremos una línea recta con pendiente constante;

Si expresamos la ecuación de esta recta tenemos que:

$$\text{TENSIÓN DE CORTE} = M * \text{VELOCIDAD DE CORTE} \quad (5)$$

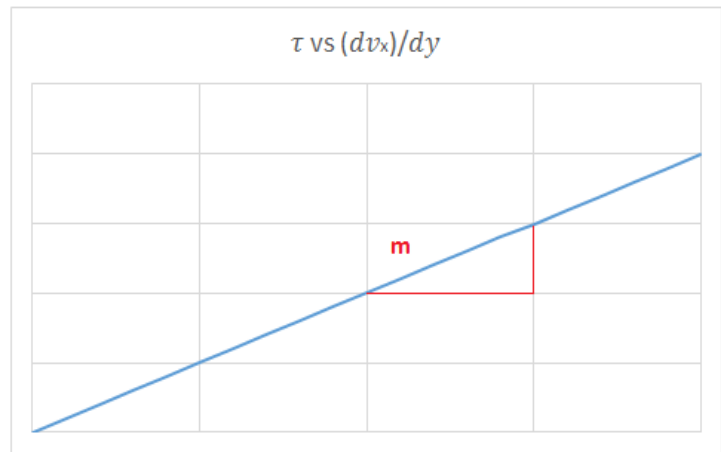


Ilustración 6. Tensión de corte vs velocidad de corte para un fluido Newtoniano



Donde μ será tomado como la viscosidad del fluido, ya que esta permanece constante, por lo tanto de la gráfica viscosidad vs esfuerzo de corte obtendremos la siguiente gráfica:

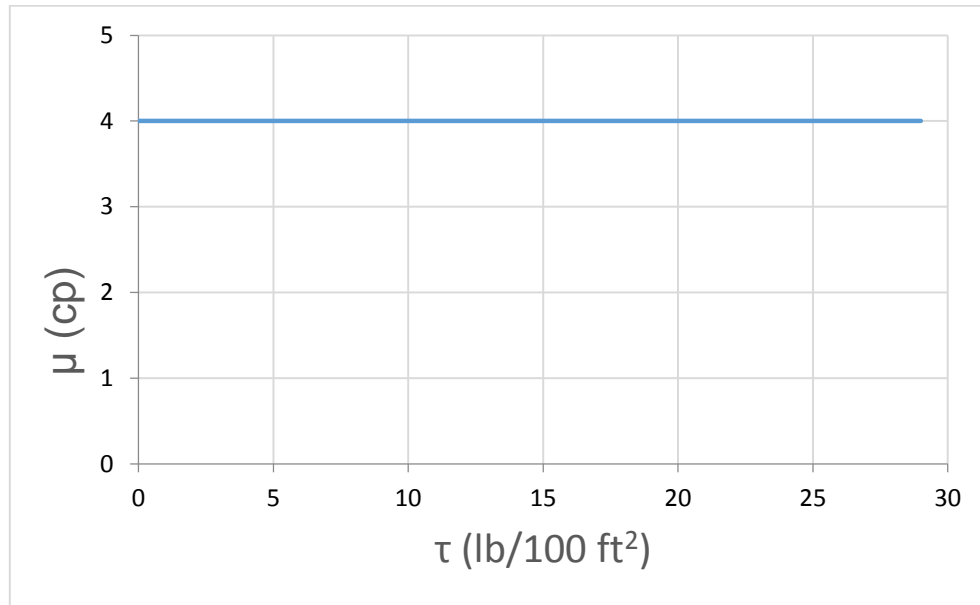


Ilustración 7. Viscosidad vs esfuerzo de corte - FLUIDO NEWTONIANO

Aquellos fluidos que no se comporten de la manera anteriormente expuesta se consideraran como fluidos no newtonianos.

4.3.2. Fluidos no newtonianos.

Este tipo de fluidos se caracterizan por no manifestar una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, por lo tanto la viscosidad no permanece constante a diferentes velocidades y tensiones de corte. Los fluidos newtonianos se pueden dividir en dos grandes grupos:



- **INDEPENDIENTES DEL TIEMPO:**

La reología de este tipo de fluido no se ve afectada por el cambio o duración del corte o su historia de corte:

- **FLUIDOS PLÁSTICOS DE BINGHAM**

Este es un caso idealizado de los fluidos no-Newtonianos, se tiene un comportamiento lineal de la relación esfuerzo de corte – Velocidad de corte, sin embargo debe existir un esfuerzo cedente de cierta magnitud para que el fluido empiece su movimiento.

- **FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS**

Este caso un esfuerzo cortante de un valor infinitesimal será capaz de iniciar el movimiento del fluido, y la relación de esfuerzo cortante—Velocidad de corte tiende a cambiar, ya que el incremento en el esfuerzo cortante decrece conforme aumenta la velocidad de corte. Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, entre otros.

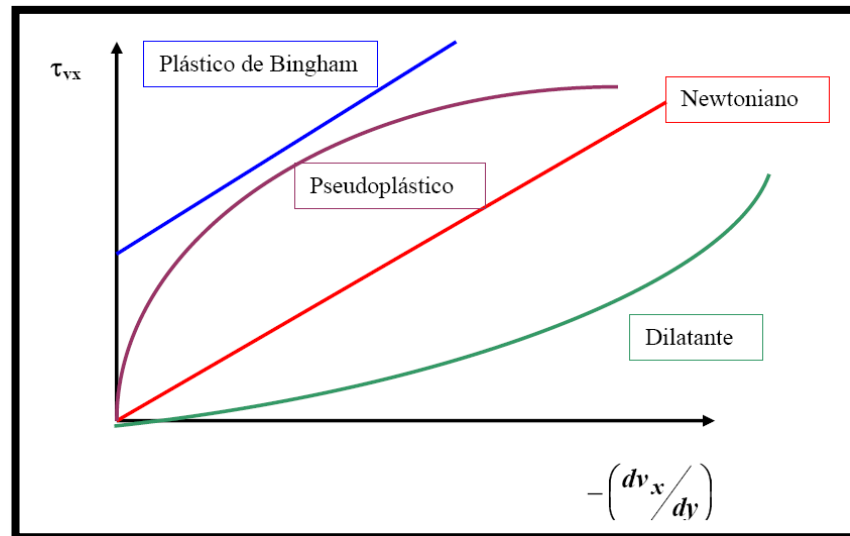


Ilustración 8. Comportamiento de fluido Newtoniano y fluidos No-Newtonianos independientes del tiempo.

○ FLUIDOS DILATANTES

El comportamiento de los fluidos dilatantes es muy similar al de los seudoplásticos, la diferencia radica en el cambio que tiene la relación esfuerzo cortante—Velocidad de corte, ya que en éste caso el esfuerzo de corte y la velocidad de corte se van incrementando periódicamente.

○ FLUIDOS SEUDOPLÁSTICOS Y DILATANTES CON PUNTO DE CEDENCIA

En estos casos como el caso del fluido plástico de Bingham, se necesita un esfuerzo cedente con un cierto valor para iniciar el movimiento, sin embargo no se conserva la linealidad, por lo contrario la relación esfuerzo cortante-velocidad de corte no es constante.



- **DEPENDIENTES DEL TIEMPO:**

Este tipo de fluidos como su nombre lo indica, sus propiedades reológicas se ven afectadas por la duración del corte (esfuerzo cortante y velocidad de corte) y los podemos dividir en fluidos tixotrópicos y reopecticos

- **FLUIDOS TIXOTRÓPICOS:**

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por la capacidad de cambiar su estructura interna debido a la aplicación de un esfuerzo. El resultado de este esfuerzo aplicado es la rotura de las cadenas que forman las moléculas.

En este caso la viscosidad disminuye conforme al tiempo en que se aplica el esfuerzo, además una vez aplicado el cizallamiento, el fluido necesitara un tiempo de reposo para recuperar su viscosidad inicial. En pocas palabras inicia un proceso de histéresis, ya que cuando existe un cambio en la viscosidad las fuerzas intermoleculares tienden a restaurar ese valor de viscosidad.

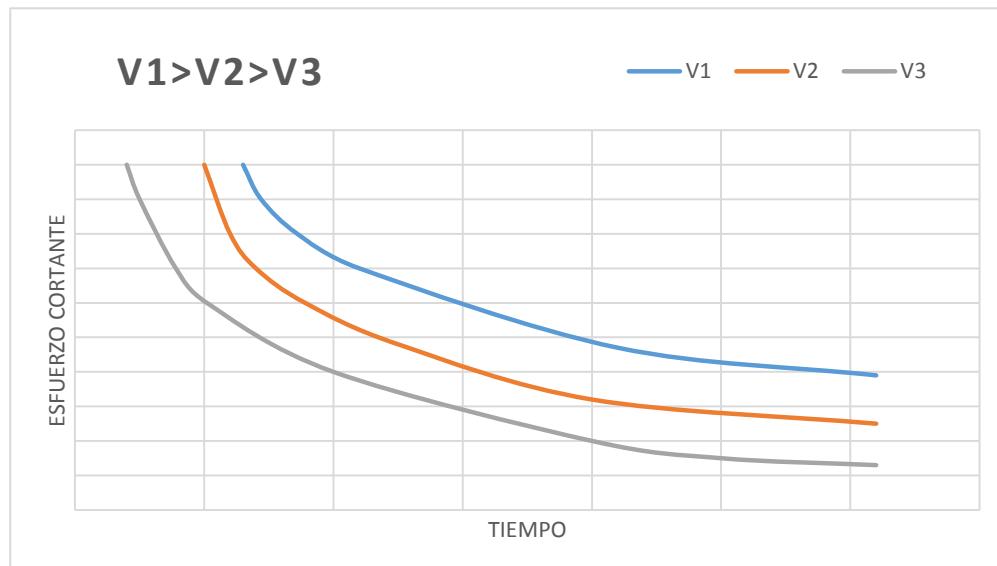


Ilustración 9. Comportamiento Fluido Tixotrópico



○ **FLUIDOS REOPÉCTICOS:**

Los fluidos reopécticos, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada.

Esto se debe a que si se aplica una fuerza, se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si ésta cesa, se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

● **FLUIDOS VISCOÉLASTICOS:**

Los fluidos viscoelásticos, son fluidos cuyo comportamiento es independiente del tiempo y presentan propiedades viscosas como un líquido y elásticas como un sólido. Tienen características físicas y químicas capaces de soportar altas presiones y temperaturas. Su principal característica es su comportamiento reológico, donde su punto cedente es mayor que la viscosidad plástica, es decir que poseen una reología invertida; lo cual es de gran ayuda para perforar pozos bajo la presencia de formaciones agotadas, presurizadas, fracturadas y/o falladas.⁵

Este tipo de fluidos contienen una combinación de polímeros que le imparten propiedades elásticas y características de alta viscosidad a bajas tasas de corte, lo cual disminuye la movilidad del fluido al yacimiento, disminuyendo el daño a la formación y manteniendo el potencial de producción del yacimiento. Por estas razones, la principal cualidad de este tipo de fluido es su excelente capacidad de limpieza y transporte de rípidos, así como su baja invasión a la formación y alto rango de operación. Es especial su uso para formaciones con alta permeabilidad, presurizadas, falladas y/o facturadas y con problemas de pérdida de circulación, también para pozos horizontales y altamente inclinados.⁴



Por ser un fluido con comportamiento elástico y viscoso, cada uno de estos tendrá conductas distintas. Con el comportamiento elástico, la aplicación de fuerzas externas provoca una deformación en la materia, realizándose un trabajo que se acumula como energía interna de deformación. Estas transformaciones son reversibles, cuando cesa la fuerza, el sistema recupera la forma y dimensión original, mientras que la energía acumulada se retoma en forma de trabajo. El comportamiento viscoso, la materia se deforma por la acción de una fuerza, pero el trabajo realizado se disipa en forma de calor. Cuando la acción de la fuerza cesa, el estado de deformación permanece.⁴

En estos sistemas el punto cedente se mantiene en un rango de 10 a 20 lbs/100ft² y el gel inicial, corrido a 3 rpm, es alrededor de 5lbs/100pft², en un lodo sin peso y mayor de 15lbs/100ft² en un lodo pesado. En un material estable el gel a los 10 minutos no excede al gel inicial en una cantidad mayor a 3 veces su valor, de lo contrario se tendría una indicación de un problema de contaminación con sólidos de perforación.⁴

4.4. **MODELOS REOLÓGICOS.**

La necesidad del ingeniero de fluidos de identificar el comportamiento del fluido tuvo como resultado el planteamiento de ecuaciones para fluidos newtonianos y no newtonianos, a través de ciertos modelos.

Para determinar exactamente el reograma de un fluido no-newtoniano que es el fluido estudiado en éste proyecto, es necesario utilizar un viscosímetro de velocidad variable, que solo encontramos en los laboratorios; ningún lodo es exactamente igual, por esta razón ninguna ecuación matemática describirá precisamente la reología de todos los lodos.



Para encontrar la relación esfuerzo de corte – Velocidad de corte se llegó a platear ciertas ecuaciones que de cierta manera se acercan al comportamiento de los fluidos, estas ecuaciones o modelos deben cumplir ciertas condiciones:

1. Debe aproximarse estrechamente a la relación verdadera entre tensión de corte y velocidad de corte.
2. Deben basarse en mediciones que puedan realizarse en el campo en forma rutinaria.
3. Deben ser suficientemente simple, de modo que los cálculos y las inferencias que se basan en el modelo puedan aplicarse en el campo.

MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM

Este modelo de fluidos no newtonianos es el más empleado en campo debido a su simplicidad y a pesar de ello, provee habitualmente una base buena para el tratamiento del lodo.

El modelo se apoya en información suministrada por un viscosímetro rotatorio, con dos lecturas del equipo se puede realizar los cálculos necesarios para determinar las propiedades reológicas. Los dos parámetros en el modelo plástico de bingham son la viscosidad plástica (PV) y el punto cedente (YP). Estos valores son hallados con las lecturas de 300 rpm y 600rpm.

$$PV (cp) = \Theta_{600} - \Theta_{300} \quad (1)$$

$$YP (Lb/100 ft^2) = \Theta_{300} - PV \quad (2)$$

$$YP (Lb/100 ft^2) = (2 \times \Theta_{300}) - \Theta_{600} \quad (6)$$

La ecuación de la recta puede expresarse en términos de los dos parámetros señalados, de la siguiente manera:



$$\text{Esfuerzo de corte} = YP + \frac{PV}{300} (\text{velocidad de corte})$$

Tabla 1. Ejemplo Datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte (IMCO manual)

Veloc. Corte Rpm	Esfuerzo. Corte lb/100 ft2	μ Cp
3	6	600
6	8	400
100	21	63
200	28	42
300	33	33
600	44	22

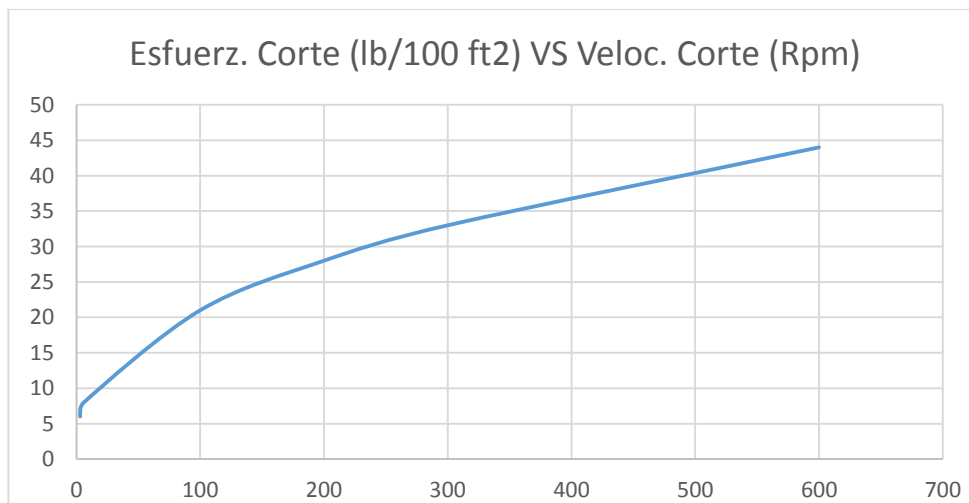


Ilustración 10. Gráfico de Datos Tabla 1

Como se observa, el comportamiento del lodo no es lineal como se está tomando en las consideraciones para la ecuación, sin embargo es muy utilizado en la industria petrolera por su simplicidad, adicionalmente es de resaltar que el análisis



debe ir acompañado de un conocimiento extenso del personal a cargo del lodo de perforación.

Aunque este modelo es un caso idealizado, las suspensiones de arcillas (20 a 60% de arcillas cálcicas en agua) asemejan su comportamiento de flujo a este modelo.

MODELO DE LA LEY EXPONENCIAL (n Y K)

Este modelo fue creado para satisfacer las necesidades donde los cálculos de otros modelos eran erróneos. El modelo de bingham es un modelo muy utilizado por su simplicidad, sin embargo este modelo podría no ser eficaz a bajas velocidades de corte, ya que los valores de tensiones de corte pueden estar alejados de la verdadera reología del lodo. Es de vital importancia tener en cuenta este aspecto, ya que cuando se maneja un pozo, éste en su parte anular presenta una velocidad de alrededor de 60 rpm, velocidad donde el modelo de bingham no es conceptualmente aplicable, de tal manera que el ingeniero debe optar por identificar un modelo que se acople a las necesidades.

En la ilustración 10 se puede observar que a bajas velocidades el comportamiento no sigue la linealidad del resto de datos, sin embargo tengamos en cuenta que la gráfica mencionada anteriormente esta en dimensiones rectangulares, de esta manera se buscó una línea de tendencia que abarcara la mayor cantidad de datos, incluyendo los de baja velocidad de corte, y esto dió como resultado una gráfica en papel logarítmico donde no solo la línea pasaba por las dos lecturas representativas 300 y 600 rpm, sino que también se acercaba a los puntos de las velocidades inferiores.

Para este tipo de tendencias se describió la fórmula para el modelo de la ley exponencial como:

$$F = K \cdot R^n \quad (7)$$

n = índice de comportamiento de flujo. (Para un fluido newtoniano n = 1, para los lodos siempre n < 1).



K = Factor de consistencia del flujo laminar. $\left[\frac{Lbf-seg^n}{100 ft^2} \right]$

El parámetro K ha llegado a ser un indicador de la concentración de sólidos presentes en el sistema o una disminución en el tamaño de las partículas. Los mejores métodos para disminuir el K es con el control y remoción de sólidos mediante métodos mecánicos y químicos.

Por otra parte para hablar del índice n, tenemos que referirnos a un fenómeno que ocurre en los lodos de perforación. En estos fluidos a diferencia de los newtonianos presentan una viscosidad elevada a bajas velocidades de corte, este fenómeno es llamado “shear thinning” o reducción de viscosidad por corte. El valor de n define el grado de este fenómeno, cuando más bajo es n, mayor es la reducción de viscosidad por corte. Entre el índice n sea menor el fluido será menos newtoniano o de una naturaleza no-newtoniana muy fuerte, por ejemplo podemos estar hablando de valores de n inferiores a 0,4. Entre más bajo n el fluido será más viscoso, resultado que no se busca ya que resultaría en un sobre esfuerzo en la bombeabilidad del lodo. La viscosidad plástica debería ser mantenida a valores mínimos para optimizar la hidráulica de la barrena y las velocidades de penetración. Si la viscosidad plástica tiende a aumentar durante un periodo determinado, sin que aumente el peso del lodo, esto indica generalmente que los sólidos finos se están acumulando en el lodo.

Si analizamos la situación de un fluido muy viscoso o en otras palabras con un valor de n bajo, en condiciones anulares entonces posiblemente tendremos problemas más adelante, la sobre presión de la bomba puede llegar a causar daños en las formaciones, por lo que una viscosidad alta en ningún momento puede ser benéfico en una operación de perforación.

MODELO DE LA LEY EXPONENCIAL MODIFICADA

La modificación del modelo de la ley exponencial se realizó debido a que su modelo anterior no tenía en cuenta el esfuerzo de cedencia inicial, ese esfuerzo inicial para

que el fluido tome movilidad. El cambio que se le realizó al modelo fue tener en cuenta la cedencia positiva G_0 .

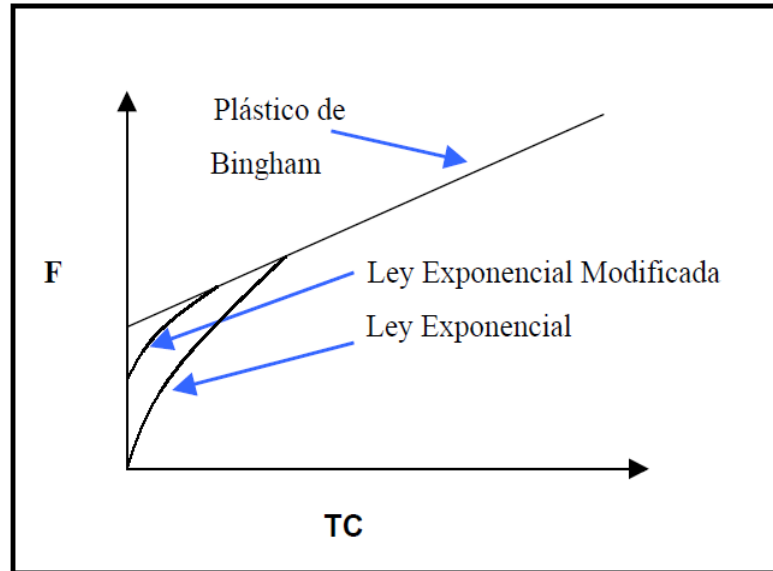


Ilustración 11. Modelos Reológicos – Coordenadas rectangulares.

Por lo tanto tenemos la siguiente ecuación:

$$F = K \cdot R^n + G_0 \quad (8)$$

Para la determinación de G_0 , haremos uso del Viscosímetro VG, de esta manera le daremos el valor a la cedencia positiva de la lectura estable de 3 rpm.

Como se observa éste modelo es un poco complejo, pero por esta razón su cálculo se aproxima más al comportamiento real de los fluidos de perforación.

4.5. GENERALIDADES DE LOS FLUIDOS BASE ACEITE.

Algunas de las características de los lodos base aceite son:

- Alta inhibición.
- Resistente a contaminantes



- Estable a altas presiones y temperaturas.
- Alta lubricación.
- No corrosivo
- Flexible.

En éste contexto, los lodos de perforación base aceite son particularmente efectivos para la perforación de:

1. Formaciones de shales y evaporitas altamente reactivas.
2. pozos profundos, altas presiones, altas temperaturas y contenido de H₂S.
3. En aplicaciones especiales tales como mejorar problemas de atascamiento de tubería.

El uso de un lodo de perforación base aceite puede justificarse cuando se requiere obtener altas tasas de penetración o simplemente cuando se necesite la reducción y eliminación de ciertos problemas que se generan durante la perforación. Sin embargo los lodos base aceite son altamente tóxicos y es por esta razón que su uso es restrictivo.

Los componentes básicos de un lodo de emulsión inversa incluyen aceite, salmuera (usualmente Cloruro de Calcio), emulsificantes primarios y secundarios, viscosificantes/gelificantes (bentonita dispensable), aditivos de control de filtrado y cal. Algunas veces la reología debe ser modificada para promover de manera eficiente la limpieza de pozos direccionales o pozos de gran diámetro.

Los “jabones de ácidos grasos son los emulsificantes más comunes usados en los lodos ase aceite. *Las poliamidas, poliaminas, imidazolinas y otros emulsificantes catiónicos son también efectivos. (Robello Samuel).*

El diésel o petróleo crudo constituyen posibles adiciones a cualquier sistema de lodo para mejorar la lubricidad, con lo que se logra una reducción en la torsión y un aumento en la penetración. En la industria de los lodos se utilizan dos tipos de



emulsiones: la emulsión de petróleo en agua y la emulsión de agua en petróleo (emulsión inversa).

4.6. FORMULACIÓN DE UN LODO BASE ACEITE

La parte de la formulación del lodo jugará una parte fundamental en el éxito o fracaso de la perforación de un pozo petrolero, ya que el lodo debe cumplir unas especificaciones de funcionalidad óptima en cuanto a:

- Sus propiedades (Densidad, Resistividad, Reología, etc.).
- Impacto ambiental.
- Factores económicos y de obtención de los materiales para dicha formulación.
- El impacto del fluido en la producción del yacimiento.

Independientemente en el lugar del mundo donde se esté realizando la perforación es importante para la compañía perforadora que el fluido además de ser funcional cumpla con las normas HSE (Health, Security, Environment).

Un lodo de perforación típicamente tiene la siguiente composición:

Arcilla y arena 3%, cerca del 4% de sal, barita 9%, agua 30% y aceite entre el 50% y el 80%. Sin embargo en la historia de la perforación se encontraran muchas composiciones para diferentes medios y para diferentes necesidades, debido a la variedad geológica en algunas partes del mundo y a los nuevos productos químicos desarrollados por la industria con el fin de ser más eficientes, partiendo de minerales inertes o polímeros con el fin de disminuir tiempos de perforación y evitar inconvenientes operacionales.



Es importante resaltar que la práctica indebida en los procesos de perforación pueden llegar a un fallo independiente de la funcionalidad del lodo, por ésta razón se debe mantener una comunicación constante entre el equipo de perforación.

Los componentes de un fluido de perforación base aceite son comúnmente:

ACEITE:

- a. **Gasoil:** se comprende los aceites medios de destilación directa del petróleo y de craqueo catalítico que hierven entre 190 y 370 grados a la presión atmosférica. Es el aceite utilizado con mayor frecuencia en la preparación de emulsiones inversas. No obstante, su uso se encuentra restringido debido a su toxicidad provocada por el alto contenido de aromáticos, sobre todo en operaciones costa afuera.

- b. **A. Minerales:** Estos aceites contienen una fracción mucho más reducida de aromáticos que el gasoil y el kerosén, y por lo tanto son mucho menos tóxicos a los organismos marinos. Se utilizan en la preparación de los sistemas 100% aceite. Son limpios, producen un olor menos desagradable que el gasoil y permiten obtener bajas viscosidades a altas tasas de penetración.

Un método usado para comparar los aceites minerales es el contenido aromático. Existen varios métodos para medir y reportar el contenido aromático de los aceites. Una de las normas propuestas es el contenido de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (o polinucleares) (PAH) reportado como fenantreno. Estos valores aromáticos de fenantreno son aproximadamente 1/10 de los valores normales por reportar, es decir mucho menos que los valores usados normalmente para expresar el contenido aromático.

- c. **ACPM:** En Colombia conocido como “aceite combustible para motor”, en otras partes del mundo se le llama diésel, este aceite es también utilizado como fluido



base para los 100% aceite, con un punto de inflamación alto y características favorables en condiciones de alta temperatura y presión, en formaciones con alto contenido de sal, además de que en las formaciones de arcilla no hay hinchamiento, se convierte en un fluido muy atractivo para la formulación de lodos de perforación, con una gran desventaja que es el impacto ambiental que este produce. La composición del aceite diésel puede variar de un refinador a otro, pero se puede usar la mayoría del aceite diesel de calidad nº 2 en los lodos base aceite sin requerir cambios en las formulaciones del lodo.

Algunos refinadores agregan rebajadores de punto de fluidez a su aceite diesel en los climas fríos (y cambian las calidades que venden) durante los meses de invierno. Esto puede afectar el rendimiento de los aditivos de lodo. El aceite diésel debería ser sometido a una prueba piloto cuando se anticipa algún problema de este tipo.

d. A. Vegetales: Existen muchas investigaciones de este tipo de aceites en fluidos de perforación, por la principal razón de disminuir el impacto ambiental que presentan este tipo de lodos. África se ha caracterizado por sus estudios con la planta de *Jatropha*, obteniendo buenos resultados en cuanto a características reológicas, de densidad y viscosidad, y lo más importante con un resultado toxicológico favorable. No podemos dejar a otros aceites que se han utilizado como el aceite de palma, de canola, de semilla de algodón, de sésamo, de soja, y en este particular caso el aceite de castor llamado comercialmente, extraído de la semilla de la higuera.

EMULSIFICANTES:

La función principal de este componente es estabilizar el sistema aceite-agua. La cal (óxido de calcio) es utilizada como emulsificador primario, debido a que se produce un jabón de calcio que genere una emulsión in situ y como función secundaria actúa como secuestrador de H_2S y CO_2 . Debe tenerse cuidado en la



cantidad de cal ya que está en exceso como cualquier solido causa un aumento indeseable en la viscosidad. Es recomendable cuando se agrega el emulsificante adicionar cal en una proporción 2/1.

Emulsificantes Primarios:

Los jabones de calcio son los principales emulsificantes en los lodos base aceite. Estos son formados en el lodo por la reacción de la cal y una larga cadena de ácidos grasos (C16 – C22). Este tipo de emulsificantes son bastante fuertes sin embargo toma algo de tiempo para que su función este al 100 % después de su creación en el sistema.

Emulsificantes Secundarios:

Son agentes humectantes de aceite muy fuertes. Generalmente estos productos no forman emulsiones como los emulsificantes primarios, pero si forman sólidos humectados por el aceite antes de la emulsión de las fases. Usualmente estos aditivos son poliamidas.

AGENTES HUMECTANTES:

Los aditivos humectantes en aceite son generalmente las poliamidas, las aminas, los fosfatos orgánicos, los hidrocarburos sulfonados etc, los cuales se utilizan en los lodos invertidos para mantener humedecidos los sólidos con aceite (entre ellos material densificante), Muchos de éstos humectantes actúan como emulsionantes. Se pueden evitar muchos problemas por ejemplo cuando se tiene a la barita humectada por el agua puede resultar en serios inconvenientes con la viscosidad. Este hecho puede ser evitado manteniendo un correcto nivel de emulsificante y adicionándole agentes humectantes al aceite. Es importante el estudio en esta parte de los aditivos ya que la mayoría de sólidos son naturalmente mojados por agua, por eso debe tener una idea clara acerca de los elementos que pueden ser útiles para que los sólidos se mantengan humectados en aceite.



VISCOSIFICANTE:

Los lodos base aceite por lo general poseen valores favorables de viscosidad, sin embargo su capacidad suspensiva es menor en comparación a los base agua, por ésta razón es de vital importancia la adición de este tipo de materiales como la atapulguita y la bentonita tratada con sales de amonio, estas sales tienen la funcionalidad de sustituir los cationes sódicos o cálcicos para lograr un arcilla dispersante en la parte oleosa, a lo que se llama arcilla organófila. Estas arcillas requieren de un activador polar para desarrollar máximo rendimiento. Entre los activadores polares están: agua, metanol, y la glicerina, siendo el metanol el más utilizado en los sistemas 100% aceite.

AGENTE DENSIFICANTE:

Este aditivo ayuda a controlar las presiones de fondo y prevenir los reventones al igual que evitar los derrumbamientos de las paredes del pozo. El densificante más utilizado es la barita (sulfato de bario), otro densificante muy común es el carbonato de calcio, este se usa en fluidos de baja densidad ya que es más fácil su suspensión que la hematita o la misma barita.

CONTROLADOR DE PÉRDIDA DE FILTRADO:

Se recomienda el uso de este aditivo a condiciones de temperatura mayores a 300 °F, algunos de los productos utilizados son la gilsonita, el asfalto y el lignito tratado con aminas.

ACTIVADOR POLAR

Para aumentar la capacidad suspensiva de los lodos base aceite se utilizan las arcilla organofílica, la cuales aumenta la resistencia de gel, aumentan la viscosidad



y le punto cedente. Estas arcillas requieren de un activador polar para desarrollar máximo rendimiento. Entre los activadores polares están: agua, metanol, carbonato de propileno y glicerina. Este activador es comúnmente utilizado en los sistemas 100% aceite.

4.7. USOS DE UN LODO 100% BASE ACEITE

- Prevenir pérdidas de circulación en formaciones con bajo gradiente de presión, debido a que es posible perforar “underbalance” con los lodos base aceite, en otras palabras se puede perforar con un peso menor al requerido. La diferencia puede variar de 0.2 a 0.4 lb/gal.
- Perforar zonas productoras, ya que estos no causan problemas de hinchamiento de las arcillas de formación y en consecuencia no disminuye la permeabilidad.
- Los lodos base aceites tienen la capacidad de ser reutilizados. Un lodo puede ser almacenado por un largo periodo de tiempo, siempre y cuando el control de crecimiento de bacterias sea suprimido. El lodo puede ser acondicionado antes de ser usado nuevamente reduciendo el contenido de sólidos perforados mediante equipo de remoción mecánico.
- Perforar pozos profundos a altas temperaturas, a diferencia de los lodos base agua que presentan grandes problemas en este tipo de condiciones.
- Perforar lutitas problemáticas, debido a las interacciones no reactivas entre las arcillas y la fase continua de éste tipo de lodo.



- Perforar domos salinos, anhídrida y yeso entre otros, ya que estos compuestos ocasionan problemas debido a la dilución de la sal en el lodo base agua, por lo tanto habría un aumento del diámetro del hoyo.
- Perforar hoyos direccionales menos problemáticos y en menor tiempo, debido a la alta lubricidad de los aceites.
- Perforar formaciones productoras que contienen H₂S y CO₂ ya que estos gases causan problemas de corrosión y alteran notablemente la reología de los lodos.
- En extracciones de núcleos o recortes de pared, ya que minimiza el daño que se le puede ocasionar a la herramienta de fondo.
- El costo de mantenimiento de los lodos base aceite a altas temperaturas es menor en comparación con los lodos base agua.
- Prevenir atascamientos de tubería en zona permeables y hoyos desviados.
- El control de corrosión es bastante eficiente, esto se debe a que el fluido es no conductivo, es térmicamente estable y generalmente no se presenta crecimiento de microbios.
- Cuando se desee una calibración de mejor cualidad, ya que la calibración de los hoyos perforados es muy buena con lodos base aceite.
- Los problemas de torque, arrastre y atascamiento de tubería se minimizan en mayor proporción con el uso de los lodos base aceite.

Los lodos base aceite también presentan ciertas aplicaciones que resultan siendo benéficas en cuanto a la economía de la operación:



- Cuando se usan como fluidos de rehabilitación.
- Usados para la colocación de fluidos para soltar la tubería pegada.
- Aumenta la velocidad de penetración al reducir la fricción, da una indicación verdadera del peso del fondo, lo que resulta en más pies por hora (velocidad de penetración)
- Ahorra energía y reduce la torsión. Mejora uniformidad de calibre del pozo y aumenta la velocidad anular del lodo debido a la menor cantidad de lavados (washouts).
- Evita el embotamiento del trépano.
- Ayuda a proteger la zona productiva, a bajar la tensión superficial del filtrado y a reducir la pérdida de filtrado.

4.8. DESVENTAJAS DE UN LODO BASE ACEITE

- El costo inicial de fabricación es alto, especialmente en formulaciones de aceite mineral o sintético.
- El impacto ambiental causado por este tipo de lodo es bastante alto, lo que llega a ser un factor determinante para decidir la naturaleza del lodo a formular en la perforación de un pozo.
- La detección de un influjo es más difícil debido a la alta solubilidad del gas en lodo base aceite.



- Los costos de operación se tornan muy altos cuando se tiene pérdida de circulación.
- Problemas ambientales relacionados con: descarga de cortes, pérdidas de lodo y su disposición final. Además que el tratamiento de los recortes es muy estricto, y la disposición del fluido cuando ya no es útil tiene unas obligaciones particulares que deben ser tenidas en cuenta en los costos post-drilling.
- Se deben tomar precauciones de evitar el contacto con la piel las cuales promueven alergias.
- Pueden ocasionar daños en las partes de elastómeros, tanto del sistema de circulación del equipo, así como de las herramientas direccionales, lo cual hace necesario el uso de elastómeros y materiales de empaque y sello que sean resistentes al aceite, tales como el nitrilo.
- Tienen riesgo potencial de incendio debido a los bajos “puntos de ignición” de los vapores que se liberan del lodo. Los aceites minerales y los sintéticos tienen un punto de ignición mayor que el del diésel.
- Por lo general se requiere de modificaciones y adiciones especiales al equipo de perforación para el manejo adecuado de lodos base aceite y para prevenir los derrames contaminantes.
- Los registros eléctricos deben ser modificados para correrse en lodos de base aceite.
- Al ser no conductivos, los registros que miden la resistividad no trabajarán en lodo base aceite (SP, Resistividad, Dipmeters).



- Lodos base aceite contienen emulsificantes muy potentes que pueden cambiar la humectabilidad de la roca a una condición mojada por aceite.
- Al ser los lodos base aceite más compresibles que los base agua, en condiciones de “downhole” la densidad puede no comportarse como se midió en el laboratorio en superficie.
- El examen geológico de los ripios de perforación se torna un poco más complicado.

4.9. CONTAMINACIÓN

Los tipos y las cantidades de sólidos presentes en los sistemas de lodo determinan la densidad del fluido, la viscosidad, los esfuerzos de gel, la calidad del revoque y el control de filtración, así como otras propiedades químicas y mecánicas. Los sólidos y sus volúmenes también afectan los costos del lodo y del pozo, incluyendo factores como la Velocidad de Penetración (ROP), la hidráulica, las tasas de dilución, el torque y el arrastre, las presiones de surgencia y pistoneo, la pega por presión diferencial, la pérdida de circulación, la estabilidad del pozo, y el embotamiento de la broca y del conjunto de fondo. A su vez, estos factores afectan la vida útil de las barrenas, bombas y otros equipos mecánicos.

Productos químicos, arcillas y materiales densificantes son agregados al lodo de perforación para lograr varias propiedades deseables. Los ripios, compuestos de rocas y arcillas de bajo rendimiento, se incorporan en el lodo por cuestiones operacionales. Estos sólidos afectan negativamente muchas propiedades del lodo. Sin embargo, como no es posible eliminar todos los sólidos perforados – ya sea mecánicamente o por otros medios – éstos deben ser considerados como contaminantes constantes de un sistema de lodo.



Es importante entender la manera en que los tamaños de las partículas contenidas en el lodo de perforación se clasifican y los tipos de sólidos que corresponden a cada categoría. Las partículas del lodo de perforación pueden variar de arcillas muy pequeñas (menos de 1/25.400 de pulgada) a recortes muy grandes (más de una pulgada). Debido a las partículas extremadamente pequeñas, los tamaños están indicados en micrones. Un micrón es una millonésima de metro (1/1.000.000 ó 1×10^{-6} m). Por lo tanto, 1 pulgada es igual a 25.400 micrones.

Los sólidos del fluido de perforación están clasificados en las siguientes categorías, de conformidad con su tamaño:

Tabla 2. Clasificación de los sólidos acuerdo al tamaño.

Categoría	Tamaño	Ejemplo
Coloidal	2 μ o menos	Bentonita, arcillas y sólidos perforados ultrafinos
Limo	2 - 74 μ (< malla 200)	Barita, limo y sólidos perforados finos
Arena	74 - 2.000 μ (malla 200 - 10)	Arena y sólidos perforados
Grava	Más de 2.000 μ (>malla 10)	Sólidos perforados, grava y cantos rodados

La agrupación de los sólidos en base al tamaño no toma en cuenta la composición física del material que se está midiendo, aunque se usen los términos “limo” y “arena”. Por ejemplo, las partículas de tamaño de limo pueden incluir partículas de lutita, arena fina, carbonatos finos y barita.

Las partículas de tamaño de arena pueden incluir partículas de arena, lutita, carbonatos, recortes y materiales de pérdida de circulación, agentes puenteantes y barita gruesa. Los sólidos coloidales incluyen la bentonita y otras arcillas; sólidos perforados muy finos (lutita, arena y carbonatos); y barita fina.

Es muy importante tener en cuenta la descomposición de los sólidos que en un fluido de perforación, en el caso de los recortes de perforación puede resultar en un



desbalance de las propiedades reológicas. En un lodo de perforación, la viscosidad aumenta proporcionalmente al área superficial de los sólidos. El área superficial de todos los sólidos debe estar humectada. A medida que la cantidad de líquido disminuye debido al aumento del área superficial, la viscosidad del fluido aumenta y la eficiencia disminuye. Los sólidos coloidales producen la mayoría de la viscosidad en los lodos de perforación, debido a este aumento del área superficial. Por este motivo, el volumen de los sólidos coloidales contenidos en el lodo de perforación debe ser controlado por razones de economía y eficacia

Si un sólido perforado original fuera un cubo de 40 micrones, su área superficial sería de 9.600 micrones cuadrados. Si se permite que este cubo de 40 micrones se degrade en cubos individuales de 1 micrón, el número de partículas será 64.000 y el área superficial aumentará a 384.000 micrones cuadrados, es decir 40 veces el valor original. El volumen de sólidos perforados no cambió durante esta degradación del tamaño de las partículas.

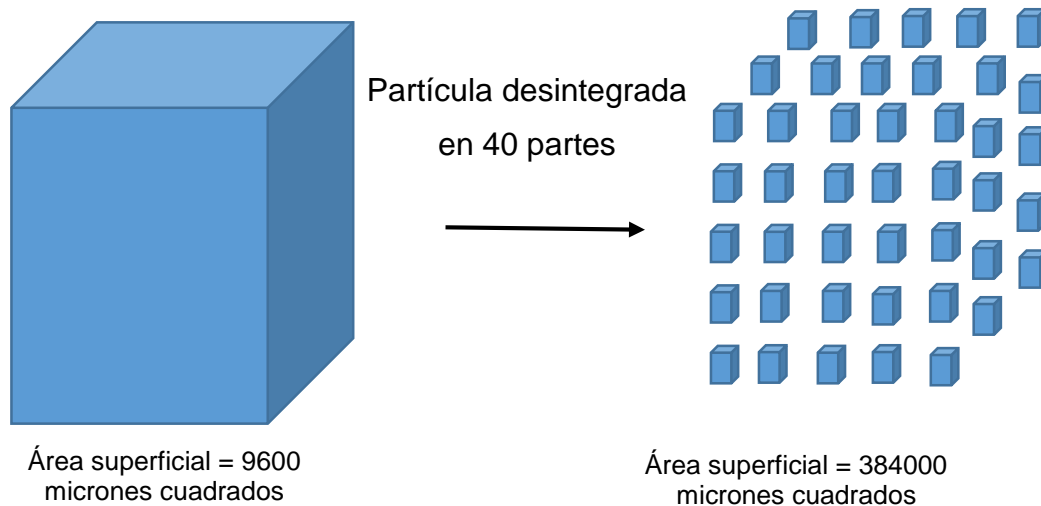


Ilustración 12. Acción del tamaño de las partículas sólidas en la viscosidad



Tabla 3. Contaminantes comunes y sus efectos en los fluidos de perforación.

Contaminant	Anhydrite or Gypsum	Cement	Trona, Bacteria, or Bicarbonate	Sodium Chloride	Calcium Chloride	Hydrogen Sulfide	Drilled Solids	Formation Oil	Carbon Dioxide
Chemical Symbol	CaSO4	Ca(OH)2	NaHCO3	NaCl	CaCl2	H2S			CO2
Properties: Plastic Viscosity							>	>	
Yield Point	>	>	>	>	>	>	>		>
10-Sec. Gel	>	>	>	>	>	>	>	<	>
10-Min. Gel	>	>	>	>	>	>	>		>
PH	<	>		<		<			<
API Filtrate	>	>	>	>	>	>			>
Total Hardness	>	>	<		>				
Chloride Concentration				>	>				
Pm	<	>		<					<
Pf	<	>		<					<
Mf			>						>
Density							>	<	
Solids Content							>	<	
Oil Content								>	
Water Content							<		
Methylene Blue Capacity							>		
Treatment Heavy Contamination	Convert to Gyp or other Compatible Mud	Convert to Lime Muds	Thinners Lime	Convert Salt Mud	Convert Salt Mud	Zn or Fe Scavengers Caustic Thinners	Water Caustic Thinners	Dilute Weight Up	Caustic Lime
Light Contamination	Soda Ash Thinners	NaHCO3 Thinners	Thinners Lime	Caustic Thinners	Soda Ash Caustic Thinners	Zn Chelates ZnCO3 NaCrO4 Thinners	Thinners Caustic Solids Control Equipment	Weight Up	Caustic Lime

> = Increase
< = Decrease



4.9.1. Problemas del control de sólidos

Pequeñas cantidades de sólidos de perforación incorporados al fluido de perforación no pueden ser evitados y generalmente no se consideran nocivos. Sin embargo, al permitir estas pequeñas cantidades, se recirculan y se acumulan generando serios problemas. Los sólidos se reducen gradualmente en tamaño como resultado de la molienda en la barrena y la ruptura mecánica causada por la bomba en la superficie y los equipos de control de sólidos. Los sólidos más pequeños aumentan el área superficial resultante; esto significa que si bien el contenido de sólidos real no ha cambiado, se requiere más fluido para recubrir la superficie expuesta. Cuando esto ocurre, habrá un aumento de viscosidad, pérdida de fluido, revoque y fuerzas de gel lo que conlleva a un aumento en los costos químicos.

Los sólidos finos pueden causar daño de formación en las formaciones productivas, limitando severamente la producción y la rentabilidad del pozo. Además de ello existen efectos químicos y mecánicos pueden resultar en problemas de control de sólidos, especialmente cuando se perforan formaciones de lutitas reactivas.¹⁰

La prevención y cura de los problemas de control de sólidos pueden incluir varios métodos:

Tratamiento Químico

El tratamiento químico involucra la utilización de floculantes para aglomerar y hacer caer los sólidos del fluido. Sin embargo, este tipo de tratamiento no está recomendado en muchos sistemas debido al efecto adverso en las propiedades de fluido y los problemas de estabilidad del pozo.



Los sistemas de fluidos inhibidos base agua y los sistemas de emulsión inversa pueden mejorar la remoción primaria de sólidos, porque las lutitas perforadas y los recortes de arcilla no se rompen o dispersan en el fluido. Esto permite que sean removidos por medios mecánicos o centrífugos antes de ser recirculados.⁹

Dilución

La dilución disminuye la concentración de sólidos en el fluido sin removerlos concretamente. Sin embargo habrá Problemas de densidad y reología que volverán a aparecer cuando aumenten los sólidos durante la perforación. La dilución es costosa debido a:

- Un aumento del consumo de productos requeridos para mantener las propiedades deseadas.
- Cuando es a gran escala, ésta provoca la descarga de grandes volúmenes de fluido de perforación debido a la falta de espacio de almacenamiento.
- En áreas ambientalmente sensibles, los costos adicionales se deben incluir para la remoción y limpieza del fluido descartado⁹.

Remoción Mecánica

El tratamiento de sólidos por medios mecánicos es a menudo el más práctico y efectivo de los métodos disponibles. Se evita la alteración indeseable de las propiedades del fluido y se consigue un ahorro adicional al reducir el volumen de dilución. Hablando en general, cuanto mayor sea el costo por unidad del fluido, mayor son los ahorros al utilizar métodos mecánicos para evitar problemas del fluido relacionados con el contenido de sólidos. El método más simple es permitir que los



sólidos decanten; sin embargo este método no es eficiente y requiere grandes volúmenes de superficie, la clave para una buena ingeniería de fluidos de perforación es una remoción exhaustiva con equipos y técnicas de control de sólidos.⁹

Un equipo efectivo de remoción de sólidos consiste en:

- Zarandas vibratorias.
- Zarandas vibratorias lineales de alta velocidad.
- Desarenador.
- Deslimador.
- Limpiador de lodo (mud cleaner).
- Dos centrífugas con capacidad de funcionamiento en remoción de sólidos y/o recuperación de barita.



Ilustración 13. Zaranda Vibratoria AWD (III) – ESVENCA9

Los reportes e información necesaria para el control de sólidos se encuentra en la Norma API 13C.



*Ilustración 14. Desarenador
ESVENCA9*



Separación Mecánica - Química:

Estos métodos combinan los químicos y los dispositivos de detección de sólidos, al igual que los que utilizan fuerza-g como método de remoción. Entre los que tenemos:

- **Floculación:** Se adicionan químicos para que los sólidos inmersos en el lodo colisionen o se coagulen y formen partículas más grandes que serán más fáciles de remover. Los tamaños coloidales son los más problemáticos, por esta razón existen ciertos compuestos que se encargan de este tipo de partículas, como por ejemplo los polímeros de alto peso molecular, aluminio, sales férricas, entre otros.
- **Dewatering:** Este método elimina sólidos húmedos y recupera el agua a través de la separación química seguida de una centrifugación a alta velocidad. El dewatering se lleva a cabo por cuestiones económicas y ambientales, y es comúnmente parte de un sistema integral cerrado, significa que no hay vertimientos utilizado en zonas de alta sensibilidad ambiental.

4.9.2. Contaminación para los fluidos de perforación base aceite

Los lodos base aceite son más resistentes a los contaminantes que los lodos base agua, sin embargo encontramos los siguientes:

Agua Indeseada:

Cuando hay agua agregada deliberadamente a un lodo de emulsión inversa, mucha agua puede causar problemas serios. Un influjo de agua puede causar viscosidades excesivas, emulsiones inestables, entre otros. Los pasos para combatir estos problemas incluyen emulsificantes, gelantes y agregación de aceite base.



Los lodos base aceite con menos del 5% de agua son mucho más susceptibles a la contaminación por agua que los lodos de emulsión inversa. Si hay una gran incorporación de agua al lodo de perforación y éste no es de emulsión inversa eventualmente tenderá a convertirse en uno solo. Se debe evitar que la estabilidad eléctrica disminuya hasta tal punto que los sólidos se conviertan irreversiblemente en mojados por agua.

Sólidos Perforados:

En la actualidad no hay un método confiable para remover los sólidos coloidales del lodo base aceite, éstos sólidos tienden a incrementarse en el sistema de circulación, provocando así cambios en las propiedades reológicas. Altas viscosidades plásticas y una cantidad elevada de sólidos de baja gravedad específica son indicadores de un lodo contaminado. Es importante resaltar que cuanto más se utilice el lodo más alto será el contenido acumulado de sólidos coloidales.

Pese a que en algunos casos se usan las centrifugas como equipo de remoción de sólidos, para componentes de tamaño coloidal éste método puede ser inefectivo. En éste caso la dilución sería una buena opción a seguir pero puede llegar a ser costosa e inviable; no obstante, se puede disminuir el costo de la dilución implementando un buen programa de control de sólidos. Afortunadamente los lodos base aceite no permiten la degradación de los sólidos, hecho que si pasa rápidamente en los lodos base agua.

Las arcillas altamente dispersas, originales de formaciones arcillosas y shales, como la bentonita comercial son bastante difíciles de remover mecánicamente del lodo. Los precipitados químicamente son extremadamente pequeños y son formados por la acción de los contaminantes dentro del lodo, como por ejemplo: la remoción de los iones del carbonato con cal o por presencia del cemento, anhídrita



con soda caustica o bicarbonato; todas estas reacciones producen CaCO_3 , el cual puede construir trenes de reacciones por un largo periodo de tiempo.

Algunos problemas operacionales son causados directamente por el exceso de sólidos, causando un “cake” grueso y una acumulación de sólidos. Un “cake” grueso puede ocasionar una pega de tubería o atascamiento, presiones de surgencia, swabbing y pérdidas de circulación. Además un “cake” con alta permeabilidad permite que grandes volúmenes de filtrado invada la formación, causando de esta manera daño en la misma. La acumulación de sólidos causan problemas reológicos, bajas ratas de perforación, desgaste en las bombas y limita la hidráulica de la broca.

Determinar el punto donde los sólidos se vuelven excesivos para el requerimiento de continuidad del taladro se define en un continuo monitoreo del lodo de la siguiente manera:

- Densidad del lodo
- Volúmenes en la prueba de la retorta.
- Mediciones MBT (cortes de perforación).

Un rango aceptable de sólidos, para una densidad de lodo, permite una mínima concentración de sólidos de baja gravedad (mayormente bentonita) y lo demás en barita. Cuando el peso del lodo empieza a aumentar podremos enterarnos que la concentración aceptable de sólidos de baja gravedad disminuye.

Gas Soluble

No hay necesidad de hacer tratamientos para contaminación por gas soluble en los lodos base aceite, las propiedades del lodo no se verán afectadas por éste factor, sin embargo, es una preocupación el desconocimiento de una patada de pozo (kick).



El gas liberado por la formación en presencia de presión puede solubilizarse en el lodo, y por tal razón es complejo detectar el influjo de gas.

Los gases como el ácido sulfhídrico (H₂S) y el dióxido de carbono (CO₂) pueden ser tratados con adiciones extra de Cal. Si se tiene en reportes de perforaciones anteriores presencia de gas en ciertos intervalos, mantenemos el exceso de concentración de Cal (determinada por el cálculo de alcalinidad) cerca de 6 – 8 lbs/bbl.

No hay peligro de fragilización por hidrógeno, porque no habrá ionización en la fase no polar continua. Si se justifica una protección adicional, óxido de zinc es un eliminador de gas ácido eficaz para su uso en lodos a base de aceite. La mayor parte del gas insoluble se puede eliminar con un desgasificador eficaz. Por otra parte, son muy pocos los cambios que podrán detectarse en el lodo cuando un hidrocarburo gaseoso incorpora en el sistema, pero el gas ácido causará una pérdida rápida de la alcalinidad.

Cantidad de Sal Masiva

Los emulsificantes de calcio pueden reaccionar desfavorablemente con cationes de formación cuando se está perforando formaciones de sal (NaCl, MgCl). Por ésta razón, cuando se perfora sales masivas, se recomienda los emulsificantes derivados de la amina por encima de los sulfonatos o los "tall oils". La alcalinidad del lodo puede disminuir debido a la precipitación del ion hidróxido y para mantenerla en los niveles deseados lo podemos hacer con adiciones regulares de Cal [Ca (OH)₂ O Ca].

Se debe asegurar que las adiciones de cal (y de todos los materiales que agreguemos) sean lo más uniformes en todo el sistema como sea posible.



4.10. ACEITES VEGETALES

Los aceites vegetales se obtienen de cultivos arbóreos o de semillas de cultivos que se siembran todos los años. Su composición son ésteres de glicerol de ácidos grasos llamados triglicéridos.

Los triglicéridos son los constituyentes principales de los aceites vegetales y las grasas animales. Los triglicéridos tienen densidades más bajas que el agua (flotan sobre el agua), y pueden ser sólidos o líquidos a la temperatura normal del ambiente. Cuando son sólidos se llaman "grasas", y cuando son líquidos se llaman "aceites". Un **triglicérido**, también llamado triacilglicérido, es un compuesto químico que consiste de una molécula de glicerol y tres ácidos grasos.

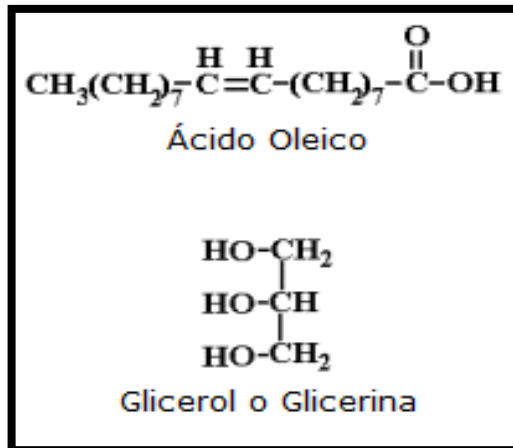


Ilustración 15. Estructura química del ácido oleico y glicerol.

El glicerol es un alcohol con tres grupos hidroxilos (-OH) que se puede combinar hasta con tres ácidos grasos para formar monoglicéridos, diglicéridos, y triglicéridos. Los ácidos grasos se pueden combinar con cualquier de los tres grupos hidroxilos creando una gran diversidad de compuestos. Los monoglicéridos, diglicéridos, y

triglicéridos se clasifican como *ésteres* — compuestos creados por la reacción entre un ácido orgánico y un alcohol que liberan agua (H_2O) como un subproducto.

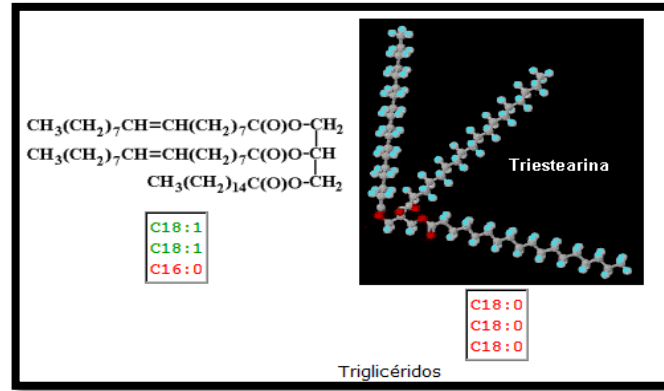


Ilustración 16. Triglicéridos

El triglicérido a la izquierda tiene dos radicales de ácido oleico y uno de ácido palmítico combinados con glicerol (la cadena vertical de carbonos); esta es una fórmula estructural típica del **aceite de oliva**. Los rectángulos debajo de las imágenes representan los ácidos grasos que constituyen las moléculas de los glicéridos. La imagen a la derecha es la estructura tridimensional de la **triestearina**, un triglicérido con tres radicales de ácido esteárico.

Tabla 4. Clasificación de aceites vegetales

ACEITE	CONTENIDO DE ACEITE DEL MATERIAL OLEAGINOSO (% EN PESO)	PRINCIPAL ÁCIDO GRASO	CONTENIDO DEL PRINCIPAL ÁCIDO GRASO (% EN PESO)
Coco	65-68	Láurico	44-52
Palmiste	45-50	Láurico	46-52
Palma	45-50	Palmítico	32-47
Oliva	15-40	Oleico	65-86
Cacahuete	45-55	Oleico	42-72
Colza	40-50	Behénico, euríco	48-60
Sésamo	44-54	Oleico	34-45
Soya	18-20	Linoleico	52-60
Algodón	15-24	Linoleico	40-55
Maíz	33-39	Oleico, linoleico	34-62
Girasol	22-36	Linoleico	58-67
Cártamo	25-44	Linoleico	78
Lino	35-44	Linoleico	30-60
Ricino	35-55	Ricinoleico	80-90

Fuente: Kirk-Othmer, Encyclopaedia of chemical technology, "Vegetable Oils". 1994.



Los pigmentos más importantes en las grasas son los carotenoides. El aceite de palma, por lo general de un rojo anaranjado brillante, contiene hasta 0.2% de betacaroteno. Muchos aceites, particularmente si se obtienen de semillas inmaduras, contienen niveles apreciables de pigmentos de clorofila que dan un tinte verdoso a las grasas. El aceite de algodón presenta un color muy pronunciado por los pigmentos de gopipol1, casi todos los pigmentos se eliminan en el blanqueado y refinado por álcali. Algunos pocos pigmentos fijos son difíciles de eliminar en el proceso y pueden ser el resultado del calor o de una oxidación excesiva en las materias primas que contienen las grasas. Los pigmentos carotenoides se decoloran en presencia de calor, luz o un tratamiento oxidativo.

En muchos aceites hay metales. El cobre y el hierro tienen importancia por el efecto adverso sobre la calidad del producto. Por ejemplo en el aceite de colza, se encuentra azufre en niveles de hasta 30 ppm, que se debe eliminar para evitar dificultades ulteriores en el procesamiento.

4.10.1. Propiedades físicas de los aceites vegetales más importantes

Tabla 5. Propiedades de los aceites vegetales

Aceites vegetales	Punto de fusión (°C)		Punto de solidificación (°C)	Índice de Saponificación (°C)	Índice de refracción	Índice de yodo	Ácidos grasos libres oleicos (%)	Peso específico	Materia no saponificable	Color
	Fusión incipiente	Fusión completa								
Oliva			0-7	188-196	51-57	79-88	1-8	0.914-0.919	0.5-1.8	Verdoso
Cacahuete			0-3	188-195	51.7-57.9	82-100	0.4-1.6	0.917-0.921	0.4-1.0	Amarillo dorado
Soya			-7 - -12	189-195	59.4-69.5	120-143	0.8-1.0	0.924-0.928	0.7-1.6	Marrón rojizo
Algodón			-5 - 5	189-198	57.9-63.8	99-114	1.1	0.921-0.925	0.8-1.8	Negro
Colza			-10 - -12	168-180	57.1 - 63.2	97-108	0.9-1.2	0.913-0.918	0.6-1.5	Amarillo parduzco
Girasol			-	183-194	60-63.5	120-140	1.1-2.7	0.922-0.926	0.3-1.5	Amarillo dorado
Cártamo ²			-	188-194	61.7-64.8	135-150	2.8	0.915-0.928	0.5-1.5	Naranja amarillento
Sésamo			-3 - -4	188-195	57.7-63.8	103-118	0.7	0.920-0.926	0.8-1.8	Amarillo claro
Coco	20-22	23-26	22-23.5	225-264	13.0-10.5	7.0-10.5	3-5	0.869-0.874	0.15-0.8	Blancuzco
Palmiste	21-24	26-29	24-26.5	242-255	35.3-39.5	14-23	2-3	0.859-0.973	0.2-1.0	Blancuzco
Palma	20-40	25-50	25-40	197-202	36-49	49-57	2-5	0.9209- .9250	0.5-2.0	Naranja
Lino		-16 - -20	-27	188-196	69.5-79	175-204	1.0	0.931-0.938	1.0-1.7	Pardo
Ricino				176-187	60.2-71.9	80-91	1-4	0.958-0.969	0.3-1.0	Amarillo claro

Fuente: Main cost foundation for Market information and commodity statistics, Oil, Fats and Oilseeds.



El peso específico, la viscosidad y el punto de fusión son las propiedades físicas de los aceites que revisten más interés en general para el proceso. En razón de las grandes semejanzas entre las moléculas de triglicéridos que hay en los diferentes aceites, las densidades y viscosidades de casi todos ellos no varían mucho. La excepción más notable es el aceite de ricino, que se caracteriza por una viscosidad y densidad muy superiores.

El peso específico de casi todas las grasas en estado líquido no tiene diferencias notables. Los valores usuales están entre 0.914 y 0.964 a 15°C.



Ilustración 18. Cultivo de Palma Africana-Bella



Ilustración 17. Maquina extractora de aceite de higuera y jatropa.

INDICE DE YODO

Indicación del grado de instauración de los aceites y grasas. Se puede decir también que se expresa como el número de centigramos de yodo absorbidos por gramo de grasa o aceite.

INDICE DE REFRACCIÓN

Se usa para probar la pureza de los productos y supervisar las operaciones de hidrogenación e isomerización. El índice de refracción aumenta con el peso molecular y tiene una relación que crece de modo aproximadamente lineal con el grado de insaturación de las grasas neutrales.



VALOR DE SAPONIFICACIÓN

Es una indicación de la hidrólisis de las grasas. Se mide como el peso en miligramos del hidróxido de potasio requerido para hidrolizar (saponificar) un gramo de grasa.

El contenido de humedad, temperatura de almacenamiento y ventilación se deben vigilar para impedir que la semilla se deteriore. Una infestación de hongos o bacterias provoca un deterioro rápido de la calidad y un contenido excesivamente bajo de humedad puede ocasionar dificultades para el descascarado.

Las materias extrañas que frecuentemente se mezclan con las semillas cosechadas se eliminan en la fase de limpieza mediante tamices y/o en algunos casos, los desechos se separan neumáticamente. Con el fin de lograr rendimientos satisfactorios en la extracción, ciertas semillas se convierten en escamas antes de enviarse a los extractores de aceite. Para las grandes semillas oleaginosas, tales como la copra y el palmiste, se usan martillos trituradores; para las habas de soja se emplean escamadoras o laminadoras. El laminado o escamado constituye un paso esencial en el proceso de extracción por solventes.



Ilustración 19. Equipo de limpieza de semillas oleaginosas.



4.10.2. Extracción.

EXTRACCION DE ACEITES VEGETALES

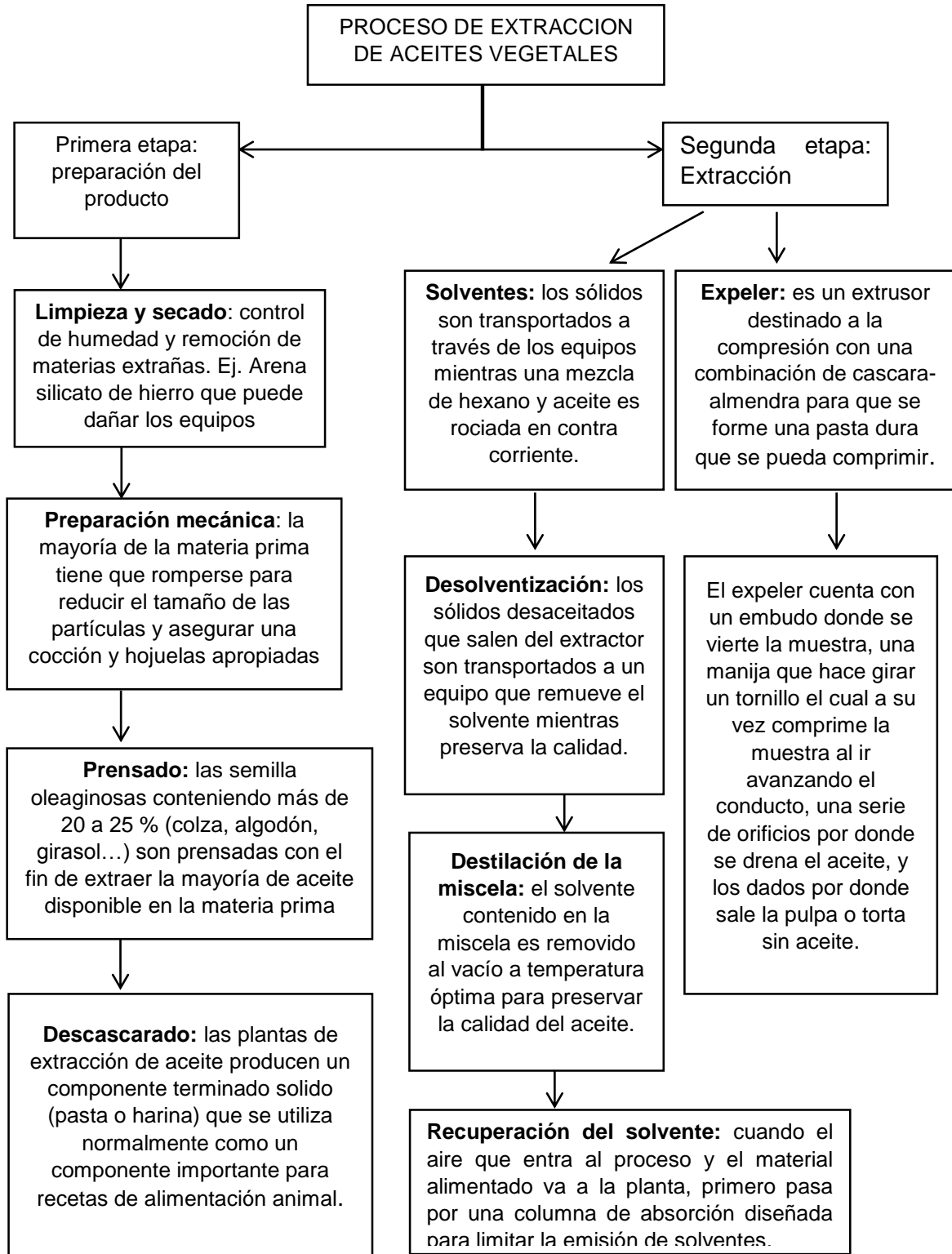




Ilustración 20. Expeller de tornillo

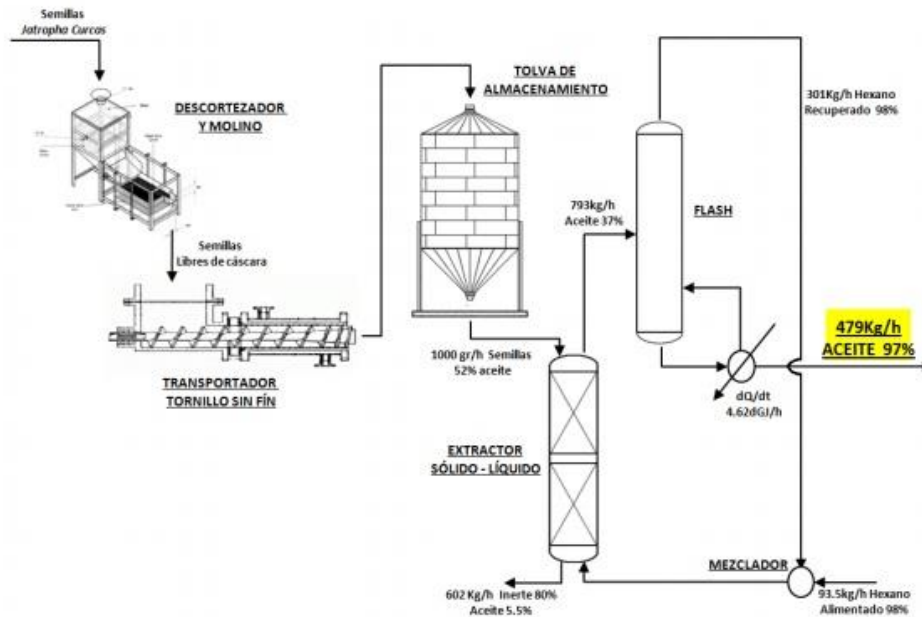


Ilustración 21. Proceso de extracción de aceite de *Jatropha* por solvente.

Fuente: Pontifica Universidad Bolivariana, Medellín

REFINACIÓN Y MODIFICACIÓN DE LOS ACEITES EN BRUTO

Las grasas que se obtienen de las semillas por los procesos mostrados anteriormente nunca salen limpias en su totalidad, muchas veces traen una serie de



otras sustancias llamadas impurezas mecánicas y por lo tanto es importante sacarlas.

La refinación puede efectuarse mediante diferentes procesos que pueden operar en procesos semicontinuos o continuos. Estos son:

- **CLARIFICACIÓN:** El aceite se deja en reposo y el agua y los cuerpos sólidos se depositan en el fondo. Con grasas sólidas y aceites poco fluyentes se trabaja con calentamiento. Para activar la precipitación se emplean a veces sustancias tales como sal común, sal glauber y cloruro cálcico, que al mismo tiempo obran adsorbiendo el agua o clarificantes como silicatos o carbón animal.
- **NEUTRALIZACIÓN:** El fin principal de este tratamiento es la saturación de ácidos libres por álcalis cáusticos, amoníaco, sosa, carbonatos de calcio y magnesio, y silicatos alcalinos. En la mayoría de los casos se emplea lejía sódica (purificación de aceites de semillas de algodón).
- **REFINACIÓN POR VAPOR:** Comprende la eliminación de gomas, blanqueo, si es necesario, y tratamiento con vapor a alto vacío para que los ácidos grasos se separen por despojamiento. Las gomas y jabones se eliminan por centrifugación y los ácidos grasos se recuperan por acidulación.
- **CON ACIDO SULFURICO CONCENTRADO:** Descompone los jabones, se combina con materias alcalinas y destruye de esta manera los cuerpos que producen las emulsiones, con lo que se facilita la sedimentación de otros cuerpos. Si es aplicado a temperaturas elevadas puede afectar la naturaleza del aceite, formando ácidos grasos libres y sulfoácidos, grasos que, con el agua, se descomponen en ácido sulfúrico y oxiácidos.



4.10.3. Aceite de higuera.

El aceite de ricino obtenido de la semilla de higuera está compuesto de triglicéridos, concretamente por ácido ricinoleico (18:1) con niveles que pueden superar el 90 %, y cantidades inferiores de otros ácidos grasos como el linoleico que es poliinsaturado, con niveles sobre un 5% y los ácidos grasos saturados palmíticos y esteárico con valores de un máximo del 2%. Tiene un contenido aceptable de Vitamina E, en forma de alfa- tocoferol y una enzima llamada lipasa.

COMPOSICIÓN DE ACEITE DE HIGUERA O RICINO

Tabla 6. Composición Aceite de Ricino

Aceite de Ricino	
Grasas Saturadas	
Ácido esteárico	1%
Ácido Palmítico	1%
Ácido Dihidroestearico	0,5%
Grasas monosaturadas	
Ácido Ricinoleico	85%
Ácido Oleico	6%
Grasas Poliinsaturadas	
Ácido Linoleico	5%
Ácido Linolénico	1%

El aceite de higuera no es considerado comestible debido a la ricinina, producto activo en la semilla, altamente tóxica para el hombre y los animales, sin embargo posee múltiples usos en diversas industrias como la automotriz, farmacéutica, cosmetológica, química, fertilizantes, pesticidas, aeronáutica, médica y actualmente en la industria de los biocombustibles.

4.10.4. Propiedades del aceite de higuera



Tabla 7. Propiedades del Aceite de Higuierilla. Fuente: Organización SCIELO

Propiedad	Unidades	Estándar ASTM	Resultado	Valor típico
Densidad	g/cm ³	D-5	0.9707	0.96
Agua y sedimentos	% Volumen	D-96	0.0	-
Corrosión	-	D-665	1A	-
Contenido de cenizas	% por peso	D-482	0.015	< 0.01
Residuo carbonoso	% por peso	D-189	0.101	0.22
Punto de inflamación	°C	D-93	279.3	270
Punto de fluidez	°C	D-97	-2	-10
Viscosidad a 40 °C	cSt (mm ² /s)	D-445	266.81	297
Índice de acidez	mg KOH/g aceite	D-1980	2.1	-
Índice de saponificación	mg KOH/g aceite	D-5558	187.4	-
Índice de Yodo	g yodo/100 g aceite	D-5554	84.3	81-97

El aceite es un líquido viscoso miscible en alcohol y ácido acético glacial, de densidad 0.9537 g/ml a 25°C. Debido a su bajo punto de congelación (-10°C) se puede obtener para empleo en motores de alta revolución. En el siguiente cuadro se resumen las propiedades físicas y químicas del aceite de higuierilla que se evaluaron en el laboratorio de bioenergía del INIFAP.

La prueba de estabilidad de oxidación del aceite de higuierilla indica que puede estar almacenado durante 11 meses aproximadamente a una temperatura de 30°C sin que pierda su calidad, después de ese tiempo el aceite empieza a oxidarse, lo que se considera como una de las principales causas del deterioro del aceite, pues da lugar a la aparición de olores desagradables, conocidos como enranciamiento.

La viscosidad del aceite de higuierilla es alta en comparación con los demás aceites vegetales que comúnmente oscilan entre 27 y 40 mm²s⁻¹ (Cuadro 1). Debido a esta propiedad química, el aceite de higuierilla conserva su viscosidad a altas temperaturas y resiste a muy bajas sin congelarse, razón por la cual se puede emplear como aceite de lubricación para los motores de los aviones.

Diversos investigadores han concluido que un valor elevado del 5% de índice de acidez indica que el aceite contiene alta cantidad de ácidos grasos libres, generado



por un alto grado de hidrólisis. Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) formando jabones, e induce menor rendimiento en la producción de biodiesel, como podemos observar en el Cuadro 1 el índice de acidez del aceite de higuierilla es menor al 5% lo que representa una ventaja importante.

Los países que llevan la el liderazgo y producción son:

- USA.
- India
- Brasill.

La literatura industrial reporta más de 700 productos que se pueden obtener por diferentes procesos industriales.

En Colombia, “la higuierilla se debe considerar como un cultivo y no como erróneamente es comúnmente catalogado con el concepto de maleza”. El cultivo de higuierilla debe ser visto y pensado como un sistema de producción competitivo en el mercado, que no compromete la seguridad alimentaria, y no compita por las tierras destinadas a producción de alimentos. Según la fuente CASTOROIL.IN, Comprehensive Castor Oil Report , Areport on castor oil & castor oil derivatives, la clasificación de la demanda mundial del aceite de castor (aceite de ricino) es :

- Muy alta = más de 50.000 toneladas al año.
- Alta = de 30.000 a 40.000 toneladas al año.
- Media alta = 15.000 a 30.000 toneladas al año.
- Baja = 5.000 toneladas al año.

Es muy importante situarse en que clasificación está el proyecto, ya que dependiendo de la demanda y oferta del país ya se generara un precio al aceite de Higuierilla



4.11. ACEITES VEGETALES USADOS EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Tabla 8. Aceites vegetales usados como fluidos base para lodos de perforación.

Aceites Vegetales usados como base para fluidos de perforación				
AÑO	INVES.	ACEITE VEGETAL	TIPO DE EXPERIMENTO	PRINCIPALES HALLAZGOS
1991	Yassin et al.	Palma	Pruebas reológicas, toxicidad filtrado y	El aceite se muestra como una promesa para los fluidos de perforación con propiedades como alto punto de inflamación, toxicidad nula, bajos precios y estabilidad en la emulsión. Sin embargo las pruebas muestran algunas propiedades indeseables como alta viscosidad plástica, alto punto de fluidez, bajo punto de anilina y alta pérdida de filtrado.
2001	Ismail, A.R.	Palma	Pruebas de toxicidad	El aceite de palma tiene baja toxicidad en comparación con el diésel con 82 % de tasa de supervivencia en organismos expuestos al fluido.
2010	Dosunmu, and Ogunride	palma y maní	Pruebas reológicas y de toxicidad	Se formularon lodos base aceite de palma en una emulsión inversa 90/10. Luego se llevó a diferentes relaciones aceite/agua mostrando características de alta viscosidad y geles progresivos. Los OBM desarrollados usando aceite de palma y maní son altamente biodegradables, tienen buenas propiedades ecotoxicas y los costos de tratamientos para los cortes son más bajos comparados con un aceite diésel, mineral o de tipo sintético.



2011	Setyawan et al.	ricino	Pruebas de propiedades físicas y químicas.	Los resultados indicaron que el aceite de ricino puede ser usado de acuerdo a la norma API estándar.
2012	Fadairo et al.	Jatropha y canola	Desarrollo de un modelo para predecir la densidad en fondo de pozo de un lodo hecho a partir de diésel, canola y Jatropha.	Los resultados de estas pruebas determinaron que la canola y la Jatropha proporcionan propiedades técnicamente viables que reemplacen los OBM diésel. Además se mostró que la química aditiva puede ser empleada en un lodo de perforación para hacerlos técnicamente más factibles. La densidad incrementó con la temperatura y aunque llegó a ser constante, en algunos puntos se incrementa de nuevo.
2012	Adesina et al.	Jatropha y colza	Pruebas reológicas, de densidad, toxicidad y filtrado	El aceite de jatropha con valores de viscosidad muy bajos, presenta poca resistencia a fluir y baja pérdida de presiones. También se probó en esta investigación que este tipo de fluidos son más seguros y menos tóxicos para la vida de las plantas y los microorganismos que habitan en los suelos.
2012	Fadairo et al.	Algas, jatropha, moringa y canola	Pruebas reológicas, densidad, pH, toxicidad y filtrado.	Los resultados de estas pruebas determinaron que los fluidos a base de aceite de algas, Jatropha, moringa y canola proporcionan propiedades técnicamente viables que reemplacen los OBM diésel. Además se mostró que la química aditiva puede ser empleada en un lodo de perforación para hacerlos técnicamente más factibles.



2013	Okie-Aghughu et al.	Semilla de caucho	Pruebas reológicas y de densidad	Los lodos de perforación presentaron una densidad de 10,6 ppg, valores de esfuerzos de gel de 210/211 lb/ft ²
				VP de 1 Cp y YP de 328 lb/ft ²
				Los lodos formulados tuvieron altas tasas de penetración y buena capacidad de limpieza del pozo.
2013	Auta, M.	ricino	Pruebas de viscosidad, gravedad específica, pH, acides, índice de saponificación, índice de refracción.	El resultado de estas pruebas mostró que los lodos de perforación tienen una estabilidad eléctrica de 222 V, una viscosidad marsh de 26,5 y 25 s a 30° y a 50° C respectivamente. Teniendo en cuenta otras propiedades se determinó que este tipo de lodos cuenta con una densidad equivalente de circulación aceptable y dentro del rango establecido.
2013	Adesina et al.	jatropha	Pruebas reológicas, de densidad, acarreo, pH.	Los resultados mostraron que los lodos de perforación base aceite Jatropha exhiben mayor adaptabilidad, mayor capacidad de acarreo y menor pérdida de presión en la tubería que un fluido base aceite diésel.



2014	Anawe paulet al.	Jatropha y maní	Pruebas reológicas y de densidad	<p>Se evaluó la viscosidad de tres muestras de lodos formulados con tres distintos tipos de aceite donde a 600 RPM el viscosímetro fann marcó 155, 135 y 50 Cp para la Jatropha, el maní y el diésel respectivamente. Los lodos hechos a base de Jatropha y maní son 3 y 2,7 veces más viscosos que el aceite diésel. Las densidades fueron 7,5 ppg, 7,9 ppg y 8,5 ppg para el diésel, el maní y la Jatropha respectivamente. Los esfuerzos de gel a 10 segundos y a 10 minutos fueron muchos más altos en el diésel que en los otros dos lodos.</p>
2014	Akintola et al.	Melón, maní, haba de soja y palma	Prueba de filtrado	<p>Las pruebas demostraron que los lodos a base de aceite diésel presentan menores filtrados a temperatura y presión ambiente también se demostró que algunos polímeros y diluyentes mejoran las propiedades de filtrado cuando se trabaja altas temperaturas. Los resultados de menor pérdida de filtrado ordenan jerárquicamente los fluidos de la siguiente manera: base melón, maní, haba de soja y palma.</p>
2014	Ebike, k.	Haba de soja	Pruebas reológicas, de filtrado, densidad, pH.	<p>Estos lodos demostraron tener un comportamiento reológico similar a los realizados por aceite diésel, con propiedades como: baja viscosidad, baja pérdida de filtrado y un cake demasiado delgado en comparación con el del diésel lo que nos indica que el aceite de haba de soja es un buen prospecto en lodos de perforación.</p>



4.12. PERDIDA DE FLUIDO

PERDIDA DE CIRCULACIÓN:

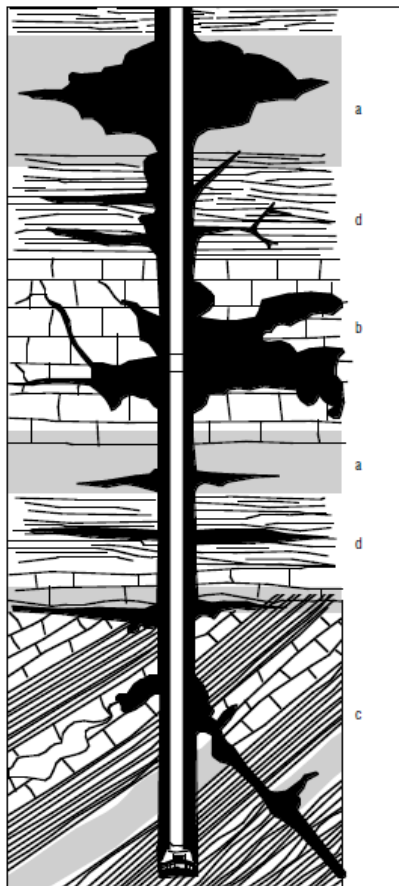
En este trabajo dedicaremos un capítulo especialmente para resaltar la importancia de la pérdida de fluido a las formaciones donde se está perforando, debido a que un punto débil de los lodos base aceite es el costo del fluido, y no se puede permitir perder el fluido en las operaciones.

Es de resaltar que la pérdida de circulación puede ser el origen de otros problemas en el pozo que aumenten el NPC (non-productive cost) como: pega de tubería (stuck pipe), inestabilidad del pozo, mala adherencia del cemento, arremetidas, entre otras. Las principales operadoras han cuantificado pérdidas económicas por \$150 MMUSD/año en operaciones de perforación debido a pérdidas de circulaciones parciales o totales que se ha tenido, esto por malas prácticas por parte del equipo de perforación, desconocimiento de información más detallada de las formaciones que se están perforando, o simplemente existen zonas donde se perfora perdiendo fluido como algunas formaciones naturalmente fracturadas u otras que poseen intervalos cavernosos.³

La pérdida de circulación es detectable cuando esta condición se cumple $\text{Flujo Saliente} < \text{Flujo Entrante}$, una condición que es fácilmente identificable con el nivel de los tanques, ya que esta empieza a disminuir progresivamente dependiendo de las condiciones. La pérdida de circulación se puede detectar mediante un sensor que registra la cantidad de flujo de retorno o mediante indicadores de volumen en los tanques. Dependiendo de la magnitud del volumen de pérdida de lodo, las operaciones de perforación pueden verse considerablemente afectadas.

Como mencionamos existen ciertos tipo de formaciones críticas donde el ingeniero debe tomar decisiones acertadas para lograr pasar dichas zonas en el menor tiempo posible, y perdiendo la menor cantidad de fluido especialmente si es base aceite o mineral por su costo y la naturaleza reutilizable de estos. Estas formaciones son:

Tipo de Formación	Tipo de Perdida
Cavernosa	Parcial o Total
Fracturada o Muy permeable	Parcial o Total



Existe una situación donde la perdida de circulación es causada por fracturas inducidas por el mismo fluido de perforación, cuando se tienen presiones demasiado altas perforando corremos el riesgo de exceder la presión de fractura, creamos un daño y adicionalmente nos exponemos a tener pérdidas parciales del lodo.

- a. Arenas no consolidadas y grava de alta permeabilidad.
- b. Zonas cavernosas o fisuradas en carbonatos (caliza o dolomita).
- c. Fracturas Naturales, fallas y zonas de transición en carbonatos o lutitas duras.
- d. Fracturas inducidas por el exceso de presión

*Ilustración 22.M.I. SWACO
Diagrama Formaciones*

CASOS SEGÚN LA FORMACIÓN:

Podemos clasificar las pérdidas en dos tipos de situaciones: (1) cuando la formación tiene cavidades, cavernas, fisuras, fracturas naturales o cualquier espacio por



donde el fluido pueda fluir y (2) cuando se fractura la formación por acción de la perforación, a esta última le llamaremos Invasión.

Cuando tenemos pérdida de circulación por invasión debemos tener en cuenta que existen varios tipos de formaciones que ya han sido estudiadas y existen productos para trabajar con rocas con cierto tipo de características, como por ejemplo:

Formaciones de grano grueso no consolidadas:

La alta permeabilidad que presentan facilita la invasión del lodo a la formación, como se ve en la Ilustración 22 genera un gran lavado (Wash out) del pozo, sino se controla de manera adecuada el problema tendremos una pérdida incremental por unidad de tiempo transcurrida, si aumentamos condiciones críticas se pueden dar las variables que resulten en un problema mayor, por lo tanto es muy importante saber cómo reaccionar, que aditivo es útil para este tipo de inconvenientes en formaciones no consolidadas. Es frecuente encontrar condiciones para este tipo de pérdida en las arenas y los lechos de grava poco profundos.³

Las formaciones agotadas o depletadas (generalmente arenas):

Es común que en un mismo campo se produzcan varias arenas, cada formación productora tiene ciertas características de presión, fluidos, mineralogía, etc, por lo tanto al perforar estas diferentes arenas el plan de perforación debe tener consideraciones para cuidar la integridad del pozo. Cuando se produce dichas arenas por mucho tiempo se pierde la presión, es muy probable que al atravesar dichas formaciones encontremos que estos valores están por debajo de lo normal (agotadas). El problema radica en la variación de formaciones de alta y baja presión, ya que el lodo debe tener un peso tal que controle las presiones de las zonas, sin embargo puede que dicho peso sea demasiado alto para las formaciones depletadas provocando así que el fluido de perforación invada la formación mencionada. Ahora en este caso es común conocer las zonas problemáticas ya que son campos estudiados a detalle, por dicha razón se generan estrategias para



controlar las pérdidas de circulación y pegas de tubería usando materiales puenteantes y de relleno, formando así un buen selo y un buen revoque en la formación agotada.³

Las formaciones con cavernas:

Estas formaciones son comúnmente de origen volcánico o compuesto de carbonatos (caliza y dolomita) y son o están relacionadas con zonas de baja presión. Generalmente se trata de pérdidas repentinas y completas acompañadas por una pérdida de peso sobre la mecha y sobre la sarta. Generalmente, la mecha cae varios pies antes de encontrar la formación otra vez. Regularmente, no es posible tratar de llenar la caverna con lodo.

Formaciones naturalmente fracturadas:

En la naturaleza existen fracturas generadas por sucesos naturales a diferencia de las fracturas generadas por sobrepasar la presión de fractura en operaciones en pozo. Para este tipo de zonas es factible impermeabilizar las fracturas balanceando las presiones del pozo y de la formación, de esta manera controlando daños a la formación y pérdida de fluido. Tengamos en cuenta que las pérdidas de fluido se pueden dar en los límites sellados de las fallas.

Fracturadas inducidas:

Como se mencionó las fracturas inducidas se generan por que la presión del fluido es mayor que la presión de fractura. Las perdidas pueden variar desde una velocidad lenta hasta una rápida perdida, todo depende de las presiones que se estén manejando. Tengamos en cuenta que cuando la fractura ya se haya generado ser más difícil manejar esa zona, ya que así controlemos la presión hidrostática muy probablemente seguirá existiendo perdida ya que afectamos la integridad de la formación y muy seguramente esta no será la misma después del fracturamiento. Para evitar perder fluido por fracturar la formación la mejor estrategia es tener un plan preventivo y un cuidadoso monitoreo de las siguientes variables:



- ECD.
- Hidráulica del lodo.
- Velocidad de la sarta en las maniobras realizadas.
- Presión de poro.
- Gradiente de fractura.

CASOS QUE GENERAN PERDIDA POR FRACTURAMIENTO DE LA ZONA

Error en la colocación de la tubería de revestimiento (profundidad):

Siempre se debe tener muy claro la diversidad de presiones que existen pasando varias formaciones, y especialmente en zonas de transición, en otras palabras cuando se pasa de presiones normales a presiones anormales. El lodo más pesado (requerido para balancear las presiones crecientes) inducirá frecuentemente la fracturación en el asiento débil de la zapata. Las pérdidas causadas por la fracturación ocurren generalmente cerca del asiento de la zapata anterior, y no a la profundidad de la barrena, aunque la tubería de revestimiento haya sido colocada correctamente.⁷

Presiones de fondo excesivas:

Este caso se presenta por un número de condiciones tales son:

- Hidráulica inapropiada.
- Caudales y velocidades de bombeo excesivos, lo que causa altos ECD.

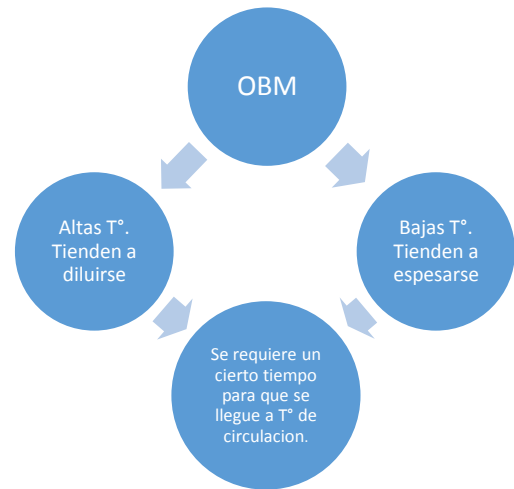
Prácticas de perforación

- Subir o bajar la tubería demasiado rápido (subiendo causando efecto de suabeo/ bajando causando efecto de pistoneo).



- No siempre una alta ROP es lo que se necesita, la velocidad de penetración debe ser congruente con la velocidad con la que se está limpiando el agujero (velocidad anular) ya que si la velocidad de penetración (ROP) es demasiado y no es suficiente la limpieza del pozo podría terminar en un alta ECD por la cantidad de sólidos presentes.

- Al maniobrar las velocidades de la bomba se debe realizar con cuidado ya que un cambio brusco de velocidad de bombeo después de haberse realizado conexiones y viajes puede generar una fractura. Especialmente en los lodos base aceite el aumento de GPM debe hacerse lentamente para que las presiones de circulación sobre la formación no sea tan altas por consideraciones de temperatura, recordemos que algunas propiedades de los aceites son muy sensibles a los cambios de temperatura.



- **Y en cuanto a las propiedades del lodo:**

Condiciones para fracturar la formación por efectos de las propiedades del lodo
Altos geles
Bajo CCI (índice de acarreo)
Revoque grueso (disminuye el diámetro de paso al fluido)
Densidad demasiado alta o cambio brusco de densidad



Asentamiento de barita

Columnas de lodo desbalanceadas
--

DETECCIÓN DE PÉRDIDA SEGÚN LAS SITUACIONES DE PERFORACIÓN:

Perforando:

- Disminución de flujo en las líneas de retorno.
- Reducción de los volúmenes en los niveles de los tanques (parcial o total).
- Disminución de la presión de la bomba.
- Aumento de las emboadas.

Sacando tubería:

- El pozo toma más de lo normal, cuando estamos sacando tubería debemos llenar con fluido el espacio que ocupa la tubería, como se pierde volumen por la pérdida de circulación es necesario más fluido para cumplir con esa condición.
Esto es:

Volumen real necesario para llenar > Volumen teórico calculado.

Metiendo tubería:

- Desplaza menos volumen al meter la tubería (menor volumen de retorno).

La medición cuidadosa de la tubería es fundamental en las operaciones de perforación, una de las razones es para tener un cálculo lo más cercano a la realidad de volúmenes internos y anulares para realizar un mejor análisis de las diferentes situaciones que se presenten en la operación.



Información necesaria para casos de pérdida de circulación:

Tabla 9. Información necesaria para casos de pérdida de circulación

Datos de Perforación	Profundidad de la pérdida de circulación durante la perforación del pozo.
	Diámetro del hoyo perforado que presentó la fuga del lodo hacia la formación.
Datos de Perforación	Volumen total de lodo perdido hacia las formaciones perforadas.
	Densidad usada para perforar la formación que presentó la pérdida.
	Densidad corregida para controlar la pérdida del lodo una vez presentada.
	Píldoras utilizadas para controlar la pérdida de circulación.
	Rata de penetración de la mecha.
	Pozos vecinos cercanos.
	Duración de la perforación.
	Problemas asociados a la pérdida de circulación durante la perforación.
Datos del lodo de Perforación	Fase de la perforación
	Tipo de lodo
	Densidad
	Profundidad.
	Caudal
Registro direccional (Survey)	Profundidad medida.
	Profundidad vertical verdadera.
	Miembro o Formación correspondiente a esa profundidad.
	Inclinación.



	Azimut.
	Coordenadas de superficie y fondo.
Datos adicionales	Columna estratigráfica.
	Descripción litológica (MASTERLOG).
	Topes estratigráficos.
	Registros triples combos (Gamma Ray, Resistividad ILD-ILM, Conductividad CILD, DENSIDAD-NEUTRÓN).
	Registros de imagen (CBIL, UBI, OBMI).
Data adicionales	Núcleos de pozo.
	Modelos estáticos de las formaciones problemas.
	Presiones de formación.
	Mapas oficiales de las formaciones.
	Datos petrofísicos de las formaciones del Campo.

SOLUCIONES:

- Controlar la zona de perdida con agentes puenteantes y sentar el revestimiento lo antes posible para dejar la perdida de fluido atrás. Existen diversos materiales para disminuir la perdida de circulación. Por ejemplo:

Tabla 10. Materiales usados para pérdida de circulación.

Material	Tipo	Descripción	Conc. (lb/bbl)	Fractura Sellada (in)
Cascara de nuez	Granular	50%-3/16-10 mesh 50% 10-100 mesh	20	0,25
Plástico	Granular	50% 10-100 mesh	20	0,25
Caliza	Granular	50% 10-100 mesh	40	0,12
Azufre	Granular	50% 10-100 mesh	120	0,12



Cascara de nuez	Granular	50% 10-16 mesh	20	0,12
Perlita expandida	Granular	50%-3/16-10 mesh 50% 10-100 mesh	60	0,10
Celofán	Laminado	Laminas 3/4"	8	0,10
Aserrín	Fibroso	Particulas 1/4"	10	0,10
Heno de pradera	Fibroso	Fibra 1/2"	10	0,10
Corteza	Fibroso	3/8" Fibra	10	0,07
Semilla de algodón	Granular	Fino	10	0,06
Heno de pradera	Fibroso	Particulas 3/8"	12	0,05
Celofán	Laminado	Laminas 1/2"	8	0,05
Leña desmenuzada	Fibroso	Fibra 1/4"	8	0,04
Aserrín	Fibroso	Particulas 1/16"	20	0,02

Es esencial el uso adecuado del LCM (Lost control mud) para lograr la mínima perdida posible, ya que esto afectará al NPC (non productive cost). Es importante pre-tratar el fluido de perforación con materiales antipérdida (LCM) únicamente si se conoce con certeza que así se evitará la pérdida. No tratar el fluido previamente si solamente se supone que se evitará la pérdida de circulación.

- Si la zona que se está pasando hay una severa perdida de circulación total es recomendable perforar con un lodo aireado seguido de la colocación de la tubería de revestimiento, ya que muy comúnmente es la única forma de pasar este tipo de zonas (cavernas muy grandes, entre otras).



- **Inyecciones de lodo base aceite.** Estas inyecciones han resultado ser el método más eficaz para sellar una zona de pérdida. Estas inyecciones deberían constar de un volumen suficiente para llenar como mínimo el pozo a 50 pies por encima y por debajo de la zona de pérdida. Las siguientes inyecciones han sido las más eficaces para sellar las zonas de pérdida cuando se usan lodos base aceite.
 - **Inyección a presión de tierra diatómacea.**
 - **Inyección a presión de Carbonato de calcio.**
 - **Inyección a presión de arcilla organofilica.**

Para cada inyección se tiene un procedimiento específico de mezcla y bombeabilidad, esta información se puede encontrar en manuales de fluidos de perforación (M.I. SWACO Capitulo 14).

MEDIDAS PREVENTIVAS:

- Usar la densidad mínima necesaria para controlar presión de la formación y estabilidad.
- Determinar la colocación apropiada del casing.
- Evitar la gelatinización a alta temperatura.
- Romper circulación por etapas cuando la gelatinización sea evidente, el arranque o parada demasiado rápido de las bombas de fluido puede causar aumentos bruscos de la presión.



- Minimizar las restricciones anulares, tales como embotamiento de mecha y sarta, controlar tasas de perforación (ROP) para evitar sobrecarga de cortes, evitar la formación de revoques gruesos, usar fluidos inhibidos.
- Mantener presiones de bomba capaces de remover los recortes hechos por la mecha y conservar adecuadas propiedades de flujo de fluido en el anular. Esto reducirá las presiones de circulación y evitará el ensanchamiento del hoyo.
- Lograr que la viscosidad y las resistencias de gel se encuentren dentro un rango mínimo requerido que servirá de soporte al material densificante y a los recortes; asegurará una buena limpieza del hoyo.
- Realizar pruebas de integridad de presión después de perforar 10 a 20 pies por debajo de cada zapata del revestimiento. Esto con la finalidad de verificar la cementación y encontrar el gradiente de fractura de la formación adyacente.

La pérdida de fluido por evaporación: y la pérdida de fluido por humectación a los sólidos debe tenerse en cuenta en un % razonable para el balance volumétrico del lodo que se esté utilizando, No es un volumen relativamente significativo sin embargo el acumulado de este puede llegar a tener un gran valor económico.

4.13. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Además de la controversia por los precios del crudo que se resisten a subir este año 2016, los encabezados de los periódicos no hablan más que de la comparación utópica entre la industria petrolera y el medio ambiente, a pesar de que teóricamente dichas industrias deben presentar y seguir un proyecto de remediación basados en ciertos lineamientos legales, seguimos estando en la mira del mundo y no precisamente porque el planeta se mueva alrededor del oro negro, sino porque según algunos ambientalistas, las catástrofes naturales que están pasando



diariamente acarrear una relación directa o indirecta con las actividades de la industria del petróleo, y esto explica la estigmatización por parte de la sociedad.

En el caso de los lodos de perforación base aceite que es el objetivo en este proyecto, las críticas de los ambientalistas no se han hecho esperar y últimamente han sido vocales de diversas opiniones que no solo examinan el uso de los OBM si no también sus sistemas de disposición. Ellos argumentan que los OBM tiene el potencial de contaminar los suministros de agua (especialmente cuando se eliminan en altamar) y que contienen químicos tóxicos que generan amenazas a medios terrestres y acuáticos. No obstante algunas de estas afirmaciones tienen algo de severidad; Por ejemplo, las investigaciones recientes aseguran que desde un punto de vista químico, el aceite diésel debido a su alto contenido de aromáticos es tóxico y no biodegradable que además de contener una concentración sustancial de n-olefinas pueden ser perjudicial para la vida animal y vegetal (Dardira et al., 2014).

Estos problemas han despertado el interés de las autoridades gubernamentales de diferentes países por promulgar leyes que regulen o eliminen definitivamente el uso de los OBM. Por ejemplo, un conjunto de normas llamado “Corporate Regulations for Offshore Drilling Operations” en Arabia Saudita y establecido por el decreto No. M/9 del 18 de noviembre de 1987 estipula que todos los fluidos de perforación base aceite con sus respectivos cortes que se comprueben sean tóxicos deben ser transportados a un sitio de disposición legalmente aprobado, y dichos cortes deben limpiarse usando la mejor tecnología practica para ser descargados posteriormente lo más cerca del fondo del mar.(Sanmi, 2011). Estas y muchas más leyes han impulsado a la industria de la perforación a través del tiempo a demostrar su cumplimiento por medio de la promulgación de nuevas variaciones correspondientes a la composición de un lodo, un ejemplo de ello son los SBM (lodos base sintéticos); un SBM se utilizó por primera vez para perforar un pozo en el sector noruego del mar del norte en 1990 mientras que el primer pozo perforado con un SBM en el Sector del Reino Unido fue en 1991 y en el Golfo de México en



1992 (Friedeheim y Conn, 1996; Fechhelm et al, 1999). Este tipo de lodos son aceptables ambientalmente en especial uso para perforaciones costa afuera, además de ello se ha comprobado que tienen una toxicidad mucho más baja que el diésel o el aceite mineral al ser fabricados a partir de otros compuestos diferentes a hidrocarburos. Sin embargo, algunos SBM presentan altos costos, poca estabilidad a altas temperaturas y en ocasiones se ha registrado toxicidad acuática.

El afán por aprovechar las grandes ventajas de un lodo base aceite y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental en el planeta motivó a los investigadores a formular lodos de tipo ecológicos en los que se aprovecha el aceite vegetal de diferentes plantas para lograr el tan anhelado fluido. El maní, la palma, la colza, la jatropha y la canola ha sido blanco de grandes proyectos a nivel mundial que pese a la generación de sus resultados aceptables, difieren en sus inconvenientes que se vuelven particulares en cada aceite. Lo que sí es claro es que su factor común radica en el simple hecho de pertenecer a la amplia gama de aceites vegetales que ofrece la naturaleza y que teóricamente No presenta una cantidad considerable de aromáticos como lo manifiesta el Diésel.

4.13.1. Normatividad

A nivel general, las áreas de mayor vulnerabilidad en un sistema de perforación son las siguientes:

SEGURIDAD PERSONAL



Pese al cumplimiento de las normas y políticas de seguridad y salud que se plantean mediante las charlas a todo el personal, en ciertos casos de emergencias, la necesidad de actuar rápido hace que los trabajadores presenten alguna exposición directa (inhalación,



contacto físico, etc.) con los fluidos o algún componente de los mismos.

Es por esto que durante el desarrollo de una perforación se requiere una charla diaria de seguridad de 15 minutos con el objetivo de hacer las operaciones más confiables y evitar accidentes de trabajo. Existen áreas de mayor atención como por ejemplo en el tratamiento de los cortes, la manipulación de cal viva, silicato de sodio, etc. Donde se debe tener un cuidado especial en dotar al personal de elementos de protección como caretas de seguridad, guantes, botas y adicionalmente el conocimiento previo de las fichas técnicas que plantean entre otras cosas, el nivel de peligrosidad de los aditivos.

En el caso de los lodos base aceite, el único fluido que ocasiona un daño directo a la salud física es el Diésel. La inhalación es la ruta más frecuente de exposición, pero además se puede tener un contacto con la piel que puede estar expuestos a problemas respiratorios y afecciones dermatológicas e inclusive efectos cancerígenos.

4.13.2. Manejo de residuos

El desarrollo de la normatividad ambiental requiere de tres parámetros fundamentales:

1. Pruebas de toxicidad
2. Técnicas de minimización de desechos
3. Tratamiento y opciones de disposición.

4.13.3. Pruebas de toxicidad

Las pruebas de toxicidad generalmente se utilizan para aplicaciones en sistemas Off-Shore. Dichas pruebas se realizan mediante bioensayos los cuales se centran en la evaluación de la toxicidad de compuestos en aguas de post-larvas (ilustración 43) y juveniles de camarones. Este tipo de organismos desempeñan un



papel ecológico relevante en el ecosistema marino y en los ambientes lagunares-estuarinos.

En esta fase se mezcla un fluido de perforación con una cantidad de agua de mar en una relación volumétrica de 1:9. Dicha mezcla se agita por 30 minutos para luego dejar en reposo por 1 hora. Las partículas suspendidas son separadas de las sólidas para hacerle su estudio respectivo de toxicidad de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma API RP 13H.

En la prueba de ensayo es evaluar la mortalidad de los camarones al cabo de un tiempo determinado de exposición al fluido, en este caso son 96 horas en las que se evalúan la sensibilidad de los organismos a través de la estimación de la concentración letal media durante el tiempo (x) de la exposición. ($CL_{50} - xh$).

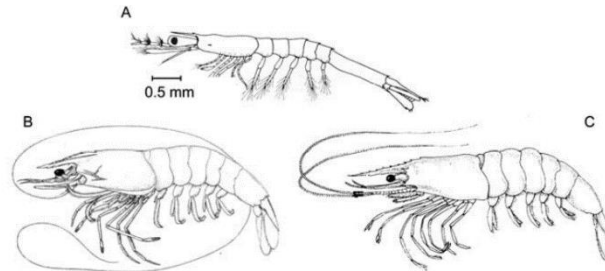


Ilustración 23. Morfología de *litopenaeus setiferus* y *Litopenaeus vannamei*.

A). Primera postlarvas de camarones peneidos (esquema producido por Dobkin, 1970), B). Camarones adultos de *Litopenaeus setiferus*, C). Camarones adultos de *litopenaeus vannamei* (esquema)

En los sistemas On-Shore las pruebas de toxicidad más comunes para determinar si un lodo es ambientalmente seguro son realizadas a ejemplares vegetales. Expertos de la Universidad de Covenant en Nigeria plantearon en el congreso HSE que realizó la SPE en Abu Dhabi 2012; que las plantas de frijol son las más apropiadas para observar el efecto de su crecimiento y supervivencia al estar expuestas a una cantidad volumétrica de 100 ml de aceite diésel, canola y jatropa



respectivamente donde las dos variables fundamentales son la tasa de crecimiento y los días de supervivencia.

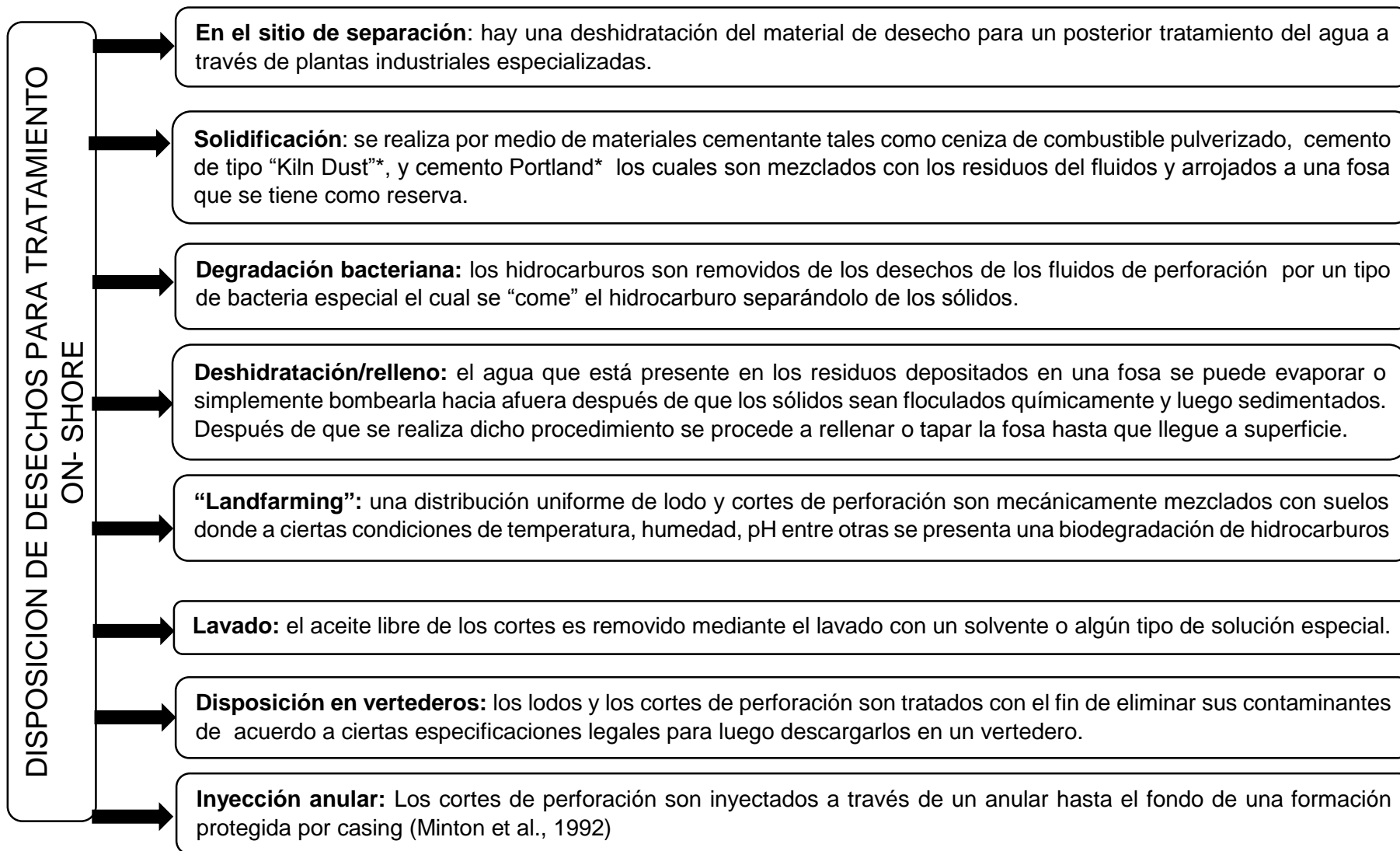
4.13.4. Técnicas de minimización de desechos

Según Robello Samuel en su libro “drilling engineering, solutions and aplcations” plantea que el mejor método para controlar la contaminación es minimizar o eliminar la formación de desechos. Los dos caminos más importantes para lograr este objetivo son los cambios en las prácticas operativas y la sustitución de productos. La primera de ellas está relacionada con las políticas de responsabilidad que presenta cada empresa y la segunda, cuando se habla de una sustitución de productos se hace referencia a la formulación y reformulación de fluidos para encontrar los requerimientos o niveles de desempeño necesarios. Se pueden citar ejemplo de sustitución de productos cuando se toma la decisión de reemplazar lignosulfonato limpio por lignosulfonato de cromo para inhibir la contaminación de metales pesados, o simplemente cambiar un lodo base aceite por uno sintético por el simple hecho de que el primero está presentando signos de contaminación más graves.

4.13.5. Tratamiento y opciones de disposición.

La disposición de los cortes de perforación puede requerir de un buen aporte económico para cumplir con las especificaciones legales.

En sistemas off-shore algunas entidades de regulación local hacen que los fluidos y los cortes sean descargados directamente al mar, otros consideran factible devolverlos a la formación a través de una inyección anular o simplemente pueden convertir el lodo en cemento y usarlo en lugar de los cementos convencionales. No obstante los tres métodos anteriores se podrían utilizar en tierra firme si se cuenta con un buen equipo que transporte los lodos y los cortes a la costa.



**Kiln Dust: se produce por la combustión de mezclas de piedra caliza, minerales, y otros aditivos a altas temperaturas en un horno rotatorio especial. **



El instituto colombiano de normas técnicas y certificación (incontec) en colaboración con más de 30 empresas, entre ellas el sector petrolero y corporaciones autónomas regionales escriben un documento guía para el tratamiento de cortes impregnados con aceite en los que se plantean tres métodos fundamentales:

1. Solidificación.
2. Bioremediación.
3. Desorción Térmica Indirecta

Solidificación

Este proceso de tratamiento consiste en mezclar los cortes y desechos con materiales estabilizantes tales como silicato de sodio, cemento, ceniza de carbón y principalmente cal viva (pureza al 65 %). La cal genera una reacción exotérmica que garantiza la deshidratación y encapsulación física de los materiales contaminantes. Los sistemas de fijación y mezcla se pueden realizar por medios equipos mecánicos como retroexcavadoras o bulldozers; este tratamiento no retira los hidrocarburos, solo los contiene y estabiliza mediante la siguiente reacción:



Para que la adsorción de la cal sea efectiva debe estar presente suficiente agua con un porcentaje en peso de acuerdo al contenido de aceite y que se estiman con un ensayo de retorta que consiste en calentar un volumen determinado de cortes en un recipiente aforado hasta lograr separar la fase líquida y sólida determinando los valores de la siguiente tabla:



Tabla 11. % wt de Cal requerida de acuerdo al contenido de aceite

CONTENIDO DE ACEITE	CAL VIVAL AL 80 %	AGUA REQUERIDA
Menor a 5	15 a 20	7
5 a 10	20 a 25	8
10 a 20	40 a 45	15
20 a 30	60 a 65	21
30 a 40	80 a 85	28

Los datos de la tabla anterior deben ser ajustados de acuerdo con la pureza de la cal empleada por medio de la siguiente formula:

$$R = W \times Q \times 80 \times ca / p \times ar$$

Donde:

p: pureza de la cal en %

Q: cantidad de la cal viva al 80 % requerida

ar: agua requerida en %

ca: contenido de agua en los cortes en %

W: peso de un barril de cortes, en lb/Bbl

R: cantidad de cal de una pureza requerida, lb/Bbl.

El monitoreo del proceso se hace mediante una prueba de laboratorio llamada "Sheen Test" que tiene por objeto verificar que el corte base aceite está en condiciones de disposición final. Consiste en tomar una muestra de 2,5 g. de residuos sólidos base aceite tratados, colocarlos en un recipiente aforados de un litro y adicionar 500 ml de agua destilada agitando fuertemente. La muestra pasa la prueba si transcurridos 15 min no se observa ningún residuo aceitoso en la superficie del agua.



4.13.6. Bioremediación

La bioremediación es un proceso de biodegradación de contaminantes estimulado y controlado por el hombre. El proceso utiliza la habilidad metabólica natural de los microorganismos para descomponer compuestos orgánicos hasta CO₂, agua y biomasa, con la ayuda de nutrientes como fósforo, nitrógeno y suministro de oxígeno.

Para llevar a cabo la biodegradación de la materia orgánica se utilizan dos tipos de microorganismos: los hongos y las bacterias los primeros degradan compuestos orgánicos simples, pero se limita su utilización debido a su versatilidad metabólica que no permite controlarlos adecuadamente. Las bacterias agrupan un amplio rango de organismos procariotes distribuidos por toda la biosfera terrestre que presenta un rápido crecimiento y una gran facilidad para adaptarse a ambientes variados.

En Colombia la técnica de biorremediación más ampliamente usada es la mezcla y disposición controlada de los residuos sobre el suelo conocida como “landfarming” que cuenta con:

- **Biorreactores:** son pequeños tanques que contienen agua bacterias seleccionadas en laboratorio, y algunos nutrientes como sales de fósforo, nitrógeno y potasio que promueven el desarrollo y crecimiento de bacterias, con la ayuda de una inyección continua de aire.
- **Celdas de tratamiento:** son celdas impermeabilizadas en su fondo, sobre las cuales se disponen los cortes y se inicia el proceso. Los cortes, generalmente mezclados con tierra limpia, son irrigados con una mezcla agua-bacteria-aditivos bioquímicos y se inicia una aireación mecánica por medio de retroexcavadoras o tractores para mejorar el suministro de oxígeno al sistema.
- **Áreas de extendido:** una vez el porcentaje de HTP (Hidrocarburos totales de petróleo) de los cortes se ha reducido y los factores que afectan el proceso han



sido ajustados, son removidos de la celda de tratamiento y llevados a áreas de extensión en las cuales continúa la aireación y adición de bacterias hasta la estabilización completa del residuo.

Aunque la biodegradación es un proceso natural, requiere de una serie de condiciones ambientales apropiadas, algunas de las cuales son manipulados por el hombre, condiciones tales como la humedad, temperatura, pH, toxicidad y tipo de contaminantes, disponibilidad y suministro de nutrientes, características del suelo, entre otras, pueden limitar parcial o totalmente el proceso de bioremediación.

DESORCIÓN TÉRMICA INDIRECTA

Este proceso de desorción térmica consiste en la aplicación de calor a los cortes y residuos con hidrocarburos, de manera que se alcance una temperatura superior al punto de vapor del contaminante. Se remueve el vapor para ser destruido térmicamente o puede ser recondensado para la fabricación de nuevos fluidos o para la generación de calor.

El material contaminado es cargado dentro de una unidad por medio de un tornillo de alimentación que recibe los residuos de las volquetas y los transporta hasta un tambor sellado de presión negativa y continuo movimiento rotacional. Allí el material es calentado indirectamente por medio de unos quemadores hasta alcanzar temperaturas superiores a las del punto de evaporación del aceite diésel vaporizando los residuos líquidos contaminantes. Los vapores son liberados a través de escapes o salidas al vacío, o pueden ser recondensados por medio de una unidad de condensación en la línea de descarga. En esta línea se remueven las partículas finas y se enfría la fase líquida en una serie de condensadores.

TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

Los lodos que no se pueden recircular por cambio de formación, pérdidas de propiedades reológicas o finalización del pozo, pueden generar severo problemas de contaminación si son descargados directamente al ambiente y tratarlos mediante



alguno de los sistemas anteriormente descritos es difícil debido a su alto contenido de hidrocarburos. Por otra parte verter o destruir térmicamente o biológicamente estos residuos sería desperdiciar el dinero que cuesta preparar un nuevo barril de lodo base aceite.

Por todo lo anterior, estos lodos residuales deben ser almacenados después su utilización en recipientes herméticamente cerrados para su posterior tratamiento y re-acondicionamiento. Dado que la principal causa de su no reutilización es el alto contenido de sólidos, que a su vez genera la pérdida de sus propiedades reológicas, el principal objetivo de re-acondicionamiento del lodo es la remoción de los sólidos que han recogido en su recorrido en el pozo. Este tratamiento puede ser físico o físico-químico si es necesario.,

ESTANDARES DE DISPOSICIÓN FINAL

El único requisito legal actualmente vigente y aplicable por la legislación colombiana para la disposición de residuos es el que expresa la resolución 2309/86, que estipula que antes de disponer los residuos se deben someter a un análisis de peligrosidad y toxicidad, y presenta una tabla de concentraciones máximas de contaminantes para las pruebas de lixiviación.

Respecto a la concentración máxima de hidrocarburos en un residuo sólido a disponer no existe actualmente en Colombia ningún requisito normativo. No obstante algunas corporaciones Autónomas Regionales han decidido adoptar como parámetro apto para la disposición el especificado en la norma 29-B de Louisiana (U.S.A), la cual estipula como concentración máxima el 1% de hidrocarburos en peso o el equivalente a 10 000 ppm. Algunos estudios han comprobado que el valor máximo permisible desde el punto de vista ambiental depende en gran medida de factores como la calidad del suelo, la peligrosidad del hidrocarburo remanente, etc



5. DESARROLLO DEL PROYECTO

5.3. SELECCIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Cuando se selecciona un fluido de perforación hay ciertos puntos importantes que se deben resaltar:

- Preocupaciones en el área de producción.
- Aplicación y rendimiento.
- El costo
- Preocupaciones en el área de exploración.
- Logística
- Impacto al medio ambiente y seguridad del personal.

Este proyecto se centrará en el último ítem para la elección del fluido base, sin embargo no se debe dejar a un lado los otros factores ya que juegan un papel importante en la actividad de perforación.

En cuanto a las preocupaciones en el área de producción, siempre el lodo de perforación causa un daño en la cara de la formación, de esta manera disminuye la producción esperada de la misma. En este proyecto se quiere además de usar un fluido ambientalmente amigable, tratar de disminuir el posible daño a la formación que este produzca, basándose en evidencia científica acerca de los dos agentes más comunes de daño a la formación que son: la barita y las emulsiones.

En el tema de las emulsiones, un aumento significativo del corte de agua provocaría desestabilización de dicha emulsión (disminución de estabilidad eléctrica), en cuanto a la barita, se llegó a la decisión de utilizar carbonato de calcio (CaCO_3) para evitar este tipo de daño, sin embargo se podría utilizar la barita en caso de que no se esté perforando formaciones productoras o de interés, en este caso podríamos



utilizar este densificante sin ningún problema. Para una aplicación en específico es indispensable hacer pruebas de compatibilidad de fluidos y de roca/fluido para saber las interacciones (cambios de mojabilidad) que se pueda tener el en proceso, de esta manera utilizar ciertos aditivos según los resultados de las pruebas de laboratorio.

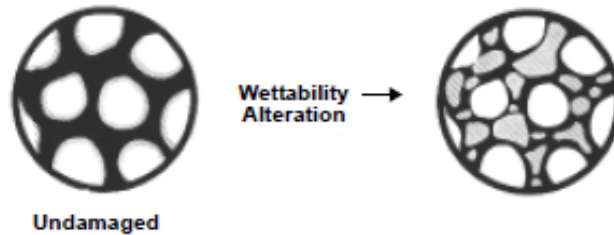


Ilustración 24. BP DRILLING MANUAL. Alteración de la humectabilidad de una formación de arenisca arcillosa.

La logística siempre será un factor decisivo para el desarrollo de un programa de lodo en áreas remotas, debe existir una estrategia de abastecimiento para los asuntos relacionados a la eficiencia de los productos (condición de almacenamiento), a la conservación de dichos productos, el transporte, el almacenamiento, el inventario y el volumen de fluidos que entraran en la locación.

Las preocupaciones en el área de exploración le conciernen en mayor parte al geólogo, ya que este interpreta los cortes de la formación que se obtienen en superficie, como es de esperarse el fluido de perforación tiene efectos en las rocas que arrastra hasta la superficie y en ocasiones es difícil caracterizar las muestras o hacer el “fingerprint” correctamente, ya que el remanente o el residuo del fluido obstaculiza patrones de migración y la identificación de las mismas rocas generadoras. Por esta razón el geólogo debe ser muy consciente de los químicos que componen el lodo y así tener un mejor concepto de las muestras que está analizando.

Una operación de perforación será exitosa y optima si se cumplió en el rango de tiempo presupuestado, si el hoyo tiene las medidas y condiciones preestablecidas,



sin accidentes en la operación y en el caso del lodo base aceite donde la gran parte del lodo sea reutilizable, si se cumplen todas estas condiciones podremos afirmar que el costo de la perforación estará en un valor que apalancado con la producción del mismo pozo se pagara en poco tiempo. Sin embargo en la planeación de la operación se debe tener un estimativo de los costos del fluido de perforación así como el costo del taladro por día, costos por movilización, etc.

5.4. COSTOS DE LODO DE PERFORACIÓN

Todos los costos asociados a la formulación, mantenimiento y manejo del lodo incluyen ciertos parámetros expuestos a continuación:

- Costos químicos del lodo de perforación (incluyendo el fluido base).
- Servicios de ingeniería de lodo Wellsite:
- Equipo de prueba (PSA/PPT).
- Equipo de control de sólidos (incuyendo zarandas y otros equipos aparte de conjunto que viene con el taladro).
- Costos de dewatering (personal, equipo y química).

Si el equipo de dewatering es usado para reciclar una fracción del fluido total procesado y recircularlo en el sistema entonces los costos de este procedimiento se realizaran de esta manera:

Costo de Dewatering

$$= \frac{\text{Vol. fluido reciclado (bbl)} * \text{Costo total dewatering (USD)}}{\text{Vol. Total del fluido deshidratado (bbl)}}$$

Ficha de evaluación económica de un lodo de perforación:



Tabla 12. Formato evaluación económica.

Evaluación Económica para OBM			
Componente (aditivo)	Volumen	Costo (\$)/bbl	Costo del componente (\$)
Aceite Base	0.55 bbls	75,64	41,6
Emulsificante	8.0 lbs	1.5	12
Humectante	4.0 lbs	1.4	5.6
Agua	0.09 bbls	0	0
Viscosificante	5 lbs	1.2	6
Controlador de Filtrado	15 lbs	0.35	5.25
Cal	3.0 lbs	0.1	0.3
Densificante	500 lbs	0.075	37.5
Total (1 bbl)	108,102		

La ficha técnica presentada tiene datos únicamente para mostrar el modelo utilizado en este estudio.

5.5. SELECCIÓN DE UN FLUIDO BASE

Históricamente el aceite Diésel ha sido usado para formular y mantener los lodos base aceite. En ocasiones se ha utilizado crudo cuando no hay disponibilidad de aceite en la locación obteniendo buenos resultados. Los aceites minerales, los nuevos fluidos sintéticos y los aceites vegetales son reemplazos del diésel, especialmente por la baja toxicidad de éstos. Sin embargo estos fluidos son comúnmente más costosos que el diésel.

Las características de los diferentes aceites varían y es muy importante realizar estudios toxicológicos, económicos, fisicoquímicos y técnicos para viabilizar su uso en operaciones de perforación. En los lodos base aceite se deben medir los siguientes parámetros para formular un sistema para unas ciertas condiciones:



Gravedad específica:

Este indicador muestra el peso del fluido. Entre más alto el valor se necesitara menos material densificante para llegar a un peso requerido.

Flash point:

Es una medición que indica la volatilidad el aceite. Es importante tener en cuenta que la volatilidad del lodo va cambiando con la edad del fluido base, además de los diferentes fluidos que puedan estar en la mezcla, como el agua, generalmente cuando adicionamos este líquido el flash point será más alto que el del fluido base¹.

Punto de Anilina

Este es un indicador relativo del contenido de aromáticos en el aceite base. Se define como la mínima temperatura a la cual volúmenes iguales de aceite base y anilina ($C_6H_5NH_2$) son miscibles². Existen ciertos productos químicos que se adicionan al lodo como la arcilla organofílica que son afectados por el contenido de aromáticos en el aceite base, por esta razón cuando el contenido aromático disminuye se necesita más viscosificante o un aditivo diferente. Si el punto de anilina es bajo, el contenido de aromáticos es mayor, y si es alto, el contenido de parafinas será entonces mayor. (CIED PDVSA, 2003). Tengamos en cuenta que existen muchas partes de caucho y elastómero en el taladro y herramientas de perforación que pueden sufrir daños y desgaste por fluidos con alto contenido de aromáticos.

Fire point:

Esta es la temperatura a la cual el vapor del aceite continuo ardiendo después de haber iniciado la ignición y removido el elemento de chispa. Esta medición es muy importante para el manejo de temperaturas para evitar incidentes y accidentes.



Cloud point:

Esta es la temperatura a la cual los sólidos disueltos no son completamente solubles, precipitándose así en una segunda fase dando al fluido una apariencia de nube.

Pour Point:

Es la temperatura mínima a la cual el fluido es capaz de fluir. Este debería ser más bajo que la temperatura ambiente para permitir la bombeabilidad del lodo desde los tanques de almacenamiento. En climas donde se manejan temperaturas de ambiente muy bajas fluidos con alto pour point serian indeseables¹.

Viscosidad:

Es una característica del fluido muy importante ya que expresa cuanta resistencia tiene el fluido a fluir, comúnmente la viscosidad del lodo es proporcional a la del aceite, sin embargo hay aditivos y otros fluidos que incrementan la viscosidad, por ejemplo la salmuera y materiales arcillosos han cumplido esta función y tenido éxito desde hace mucho tiempo. Actualmente se realizan investigaciones de miles de millones de dólares para la fabricación de químicos que ayuden a modificar la viscosidad a conveniencia.

Como se sabe la viscosidad de los aceite es sensible a los cambios de temperatura, obedeciendo una relación inversa, en cualquier caso ocurre lo mismo con la presión, por lo tanto en condiciones de pozo donde la P y T pueden ser altas y cambiantes es fundamental un reconocimiento de la viscosidad a diferentes condiciones.

Se han creado agentes químicos con el especial propósito de reducir la viscosidad del fluido de perforación, algunos son llamados adelgazantes, y su fin es reducir la



reología, aunque es muy común reducirla mediante dilución, agregando más aceite base al fluido de perforación ya formulado, de esta manera la viscosidad sin lugar a duda disminuirá.

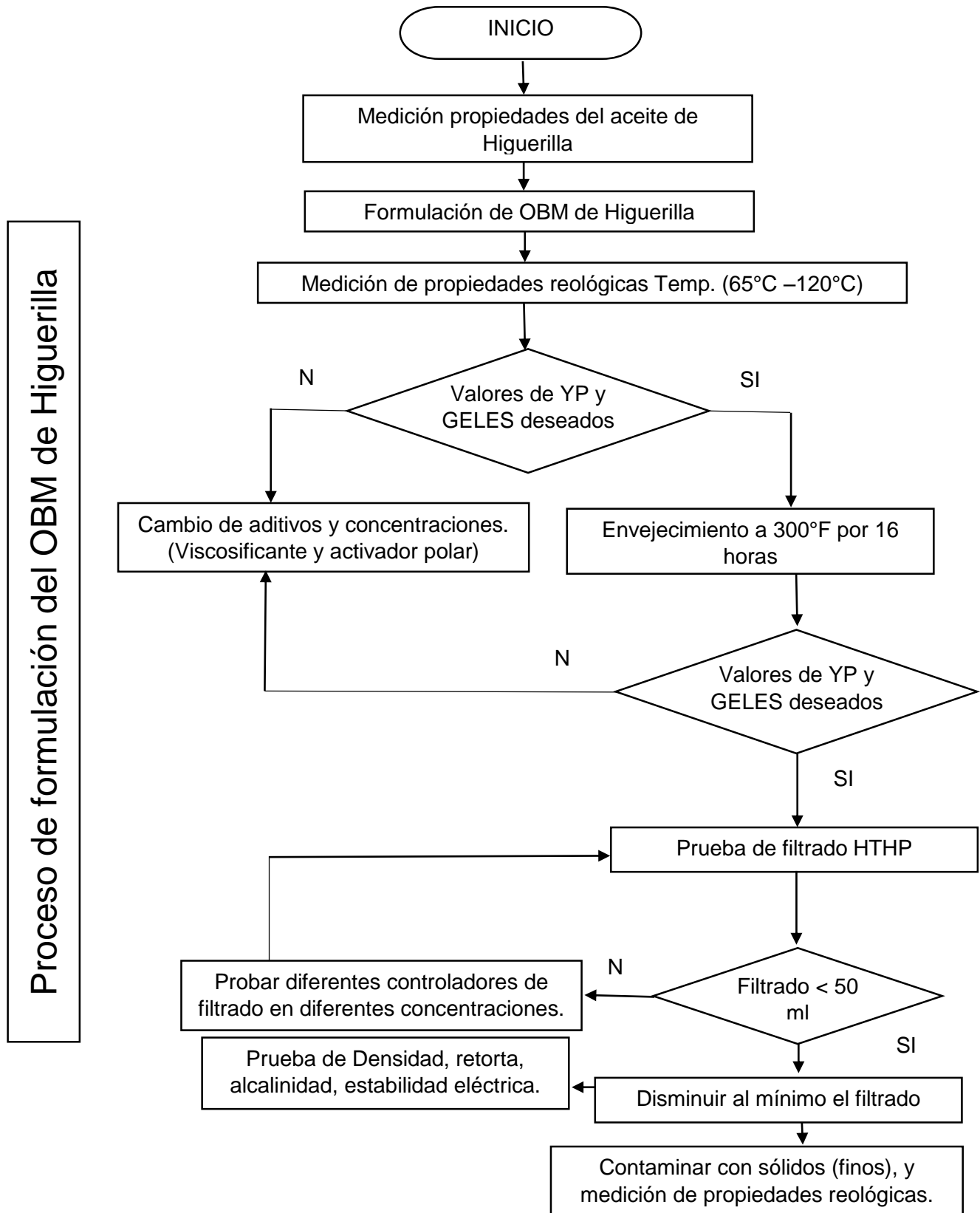
La viscosidad puede ser afectada no solo por presión y temperatura, sino también por contaminantes encontrados en la perforación. Una elevación de las propiedades reológicas sin control puede causar daños en las bombas de lodo, pega de tubería y otros problemas, que causarían pérdidas grandes de dinero y tiempo.

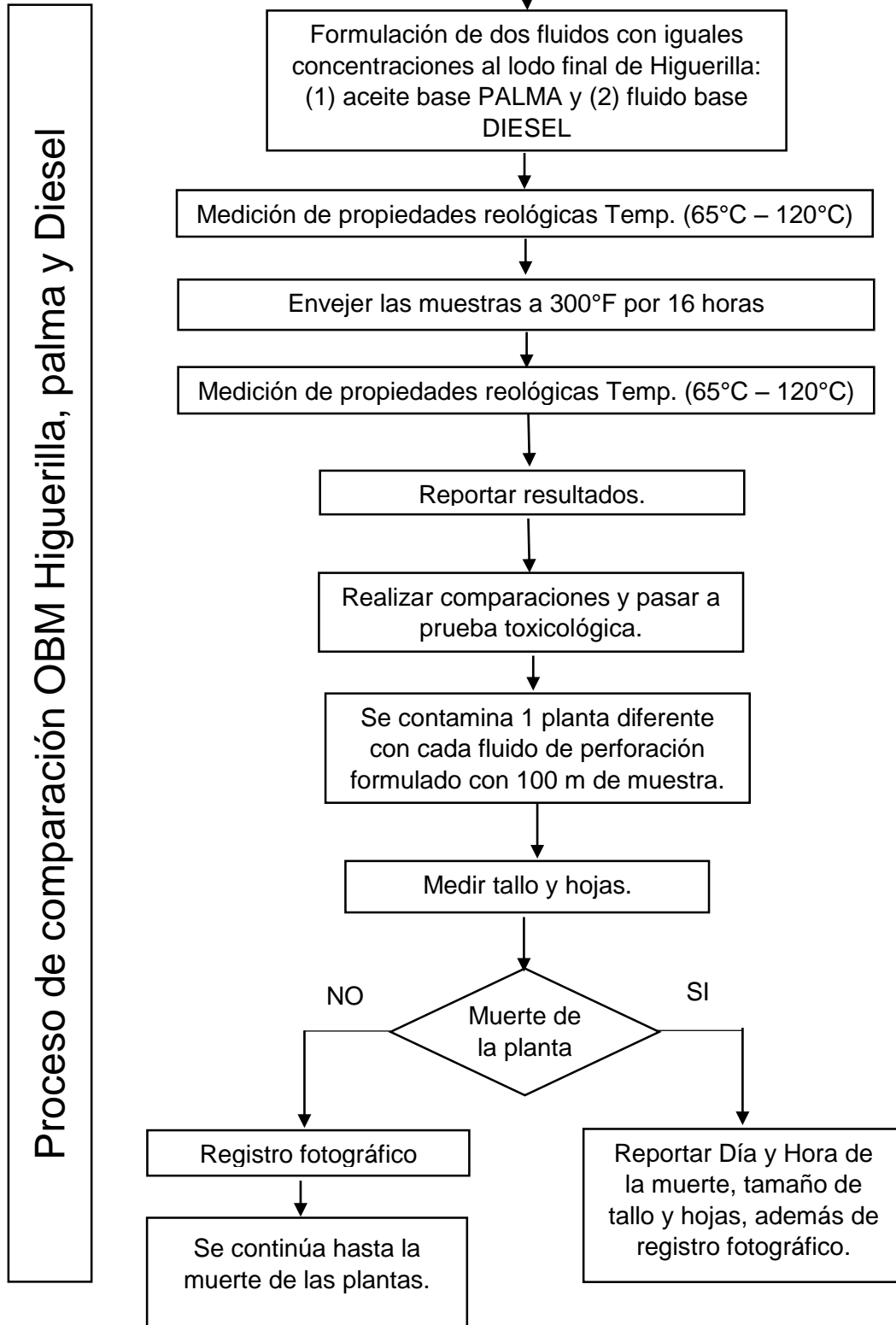
Las pruebas fueron realizadas según la Norma API13 B2 y la Norma API 13C correspondientes a “procedimientos para fluidos base aceite” y “procedimientos para pruebas en el laboratorio de fluidos de perforación”. En el ANEXO A están las pruebas realizadas en este estudio según su exacto procedimiento, el cual se siguió al pie de la letra para realizar las mediciones de manera segura, ya que se trabaja con altas presiones y temperaturas. Las modificaciones que se realizaron a las pruebas fueron únicamente para la recolección de información.

Las temperaturas manejadas fueron orientadas con el único fin de tener información sobre el comportamiento del fluido en ambientes demandantes.



5.6. PLANEACIÓN DEL PROCESO DE AVANCE DEL PROYECTO







5.7. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO

Todos los equipos utilizados son del fabricante OFITE TESTING EQUIPMENT, INC.

Viscosímetros:

Viscosímetro 800:

Viscosímetro de 8 Velocidades (Rpm) (600, 300, 200, 100, 60, 30, 6, y 3), con una precisión en las medidas de 0,1. La lectura se realiza sobre el dial (0 – 300).

Siempre se deben seguir las instrucciones del fabricante, además comprobar que el equipo este correctamente calibrado.

Para los lodos base aceite es fundamental la medición de reología a diferentes temperaturas, por esta razón en conjunto con el viscosímetro 800 se usó una termocopa de la misma compañía.

Viscosímetro HTHP:

Este Viscosímetro es usado para condiciones extremas de presión y temperatura, utiliza un aceite de confinamiento para presionar la muestra y una chaqueta de calentamiento gradual. Las condiciones pueden llegar hasta los 30,000 psi y 500°F, midiendo a tasas de corte desde 0,1 sg^{-1} hasta altas tasas. Este equipo es dirigido por el software ORCADA™, el cual puede



Ilustración 25. Viscosímetro 800.
OFITE

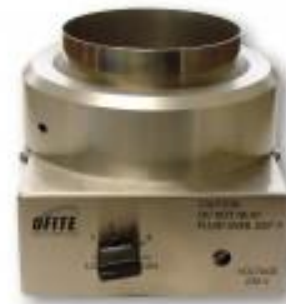


Ilustración 26. Termocopa
graduada OFITE



Ilustración 27. Viscosímetro
OFITE 77 HTHP



programar lecturas a un tiempo, temperatura y rata de corte específica, tomar varias lecturas a diferentes tasas de corte(altas y bajas) y programar múltiples programas reológicos.

Filtro prensa HTHP (HTHP Filter Press with Threaded Cells, 500 mL, Drilling Fluids)

Por las condiciones que se manejan en la prueba de filtrado, el fabricante diseño este modelo basándose en la seguridad de la persona que realiza la prueba con este equipo. La temperatura máxima para realizar la prueba con este equipo es de 500°F y una presión dentro de la celda de 5,000 psi. Se debe utilizar un papel filtro de 2.5”, Box de 100.



Ilustración 28. Filtroprensa HTHP-OFITE

Horno de envejecimiento:

Este equipo brinda una estimación del comportamiento del fluido expuesto a temperatura mientras circula en el pozo. El modelo “5 roller Oven” puede almacenar hasta 8 celdas de 500 mL y opera a una temperatura entre 100°F y 450°F). El horno funciona con uso cilindros rotacionales que mantienen en movimiento el fluido, este en especial funciona a 25 Rpm.



Ilustración 29. Horno de envejecimiento OFITE.



Las celdas de envejecimiento deben ser presurizadas hasta un valor máximo de 2,000 psi y una temperatura máxima de 500°F)



Ilustración 30. Celda de envejecimiento. OFITE

Balanza de lodo:

La 4 – Scale Mud Balance, es una balanza metálica con rangos de medición desde 6,6 – 23 lpg, 49 – 172lb/ft³.



Ilustración 31. Balanza de lodos OFITE.

Retorta:

El equipo usado para medir el % de líquidos y sólidos que tiene la muestra de lodo. La máxima temperatura a la que llega es de 1000°F, el control de temperatura es electrónico, con una capacidad de 10 mL en su celda interior.



Ilustración 32. Equipo de retorta OFITE.

Estabilidad Eléctrica:

Se usó el Emulsion Stability Tester para medir la estabilidad eléctrica al aceite, al fluido de perforación y al fluido contaminado con agua. El rango de medición del equipo es de 3 – 2000 Voltios.



Ilustración 33. Medidor de estabilidad eléctrica OFITE.



Mud Mixer:

Para la preparación de los fluidos de perforación se usó un equipo Hamilton Beach mixer. Un equipo que facilita el tiempo de mezcla por tener 3 componentes.



Ilustración 34. Mezcladora Hamilton Beach OFITE.



OFI TESTING EQUIPMENT, INC.

Por más de 30 años OFI Testing Equipment (OFITE) ha proporcionado instrumentos y reactivos para pruebas de fluidos de perforación, cementos, fluidos de completamiento y fracturamiento. Además de estas líneas de productos, también ofrece una amplia gama de instrumentos para el análisis de núcleos. Desde nuestras instalaciones de fabricación en Houston, TX que ofrecer a los clientes en todo el mundo con productos de calidad y un servicio excepcional.⁵⁵

Adicionalmente a los equipos OFITE que se mostraron en este estudio hay mas ejemplares que son muy importantes en la caracterización de un fluido de perforación, por ejemplo la medición del coeficiente de lubricidad en los lodos base aceite, lo cual se mide con un “Lubricity Taster”, equipo que OFITE tiene disponible en su portafolio de productos.

Es muy importante resaltar la necesidad de estos equipos para la realización de las pruebas en los fluidos de perforación, además de la confiabilidad que estos equipos brindan permite realizar análisis reales de las condiciones del fluido

6. RESULTADOS

6.3. EVALUACIÓN TÉCNICA

6.3.1. Selección del fluido base aceite de higuera

PROPIEDADES DEL ACEITE:

Se midió Flash point/fire point y punto de anilina en la Universidad Surcolombiana en los laboratorios de Crudos y derivados y de química de la misma. Se comparó con otros aceites vegetales y con el DIESEL para tener un estimativo de sus propiedades como aceite y la posible preferencia que se tenga para formular un lodo de perforación.

Tabla 13. Propiedades del aceite de Higuera.

Propiedad	Condiciones Atm/psi	Resultados (°C)
Flash Point	0.949/13.94	290
Fire Point	0.949/13.94	320
Aniline Point	0.949/13.94	100

Al tener un punto de anilina relativamente alto en comparación con los otros aceites de los que se tiene información, el aceite de higuera representa una menor probabilidad de ocasionar daños en los elastómeros del motor direccional situados en la sección de poder.



Ilustración 35. Parte elastómerica - motor direccional-Sección de Potencia



El aceite de higuera al igual que la mayoría de los aceites vegetales tiene valores muy altos de “flash point” y “fire point”, lo que indica que no son un peligro para la operación y de esta manera aprobarían cualquier evaluación de seguridad. Éste tipo de aceite presenta una densidad relativamente alta (0,958). Por lo tanto se podría afirmar que se necesitaría menos barita o carbonato de calcio para llegar a cierta densidad requerida.

Tabla 14. Propiedades de los aceites vegetales y Diesel.

ACEITE	PROPIEDADES					
	Den. (ppg)	Pour point	Flash point	Fire point	Cloud point	Aniline point
Palma	7,64	23-40	280	341	31	118
Coco	7,71	23	148	329	NN	116
Almendra	7,40	22	242	NN	NN	NN
Cacahuete	7,63	-3	258	342	9	NN
Colza	7,68	-2	285	344	-11	NN
Semilla de algodón	7,73	2	243	342	-1	NN
Soja	7,68	-20	330	342	-4	140
Olivo	7,68	-9	NN	NN	NN	NN
Girasol	7,68	-16	316	341	-5	NN
Higuera	7,98	-33	290	320	NN	212
Diesel No. 2	7,09	-18	66	108	-17	145

Los datos de viscosidades cinemáticas se exponen a 37.8°C (100,04°F) a excepción de los aceites de almendra y el DIESEL No2, estos aceites reportan su viscosidad a 40°C (104°C), aunque no son las mismas temperaturas para efectos de comparación es un dato útil.

Algunos aceites contienen ceras disueltas que cuando son enfriados se separan y forman cristales tomando así una estructura rígida que hace que el aceite no fluya a condiciones de prueba, es por esta razón que sus puntos de fluidez tienden a ser relativamente altos. En el caso del aceite de higuera, éste tiene el menor “pour point” o punto de fluidez de los aceites mencionados en este proyecto, pese a su alta viscosidad requiere de una temperatura muy baja (-33 °C) para poder fluir. En países como Canadá, Rusia y Argentina, donde las temperaturas pueden fluctuar entre -10 ° y -30° C, éste tipo de aceite representa una gran alternativa para usarlo como base en fluidos de perforación porque presentaría la menor posibilidad de inconvenientes al momento de fluir debido a su bajo “pour point”.

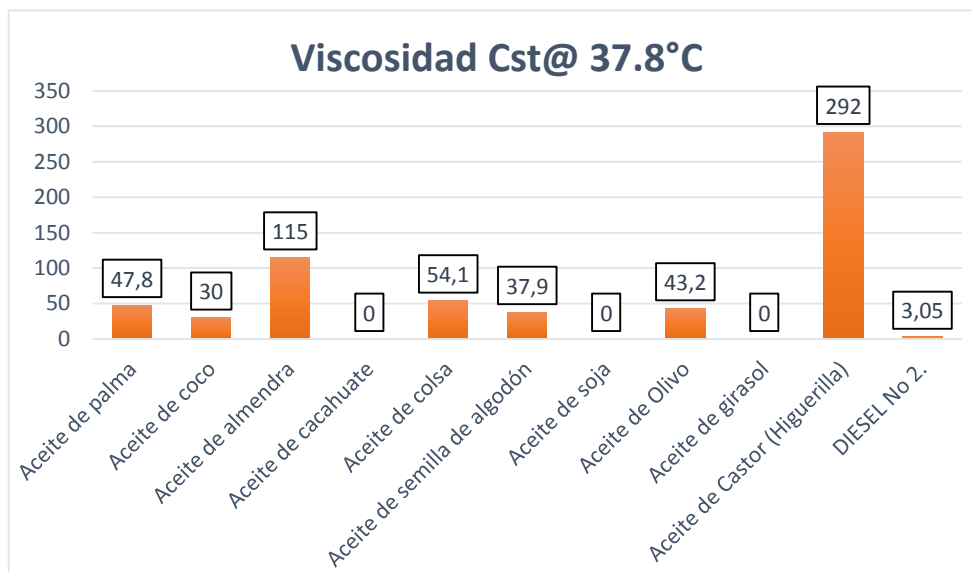


Ilustración 36. Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel

Según la fuente² los aceites de castor (Higuera), coco y Diesel No2 presentan su resultado en un intervalo presentado de la siguiente manera:

Aceite de Castor (Higuera)	259 – 325 Cst
Aceite de Coco	29,8 - 31,6 Cst
DIESEL No 2	2,7 - 3,4 Cst



Por dicho motivo se tomó un promedio aritmético para efectos de comparación.

Como se observa en la ilustración 36, el aceite de higuierilla presenta la viscosidad más alta, esto es debido a las características del ácido ricinoleico que lo compone. Pues su estructura molecular presenta un grupo hidroxilo y un doble enlace en su carbono No. 18. Los grupos hidroxilos forman enlaces de hidrogeno que incrementan de manera evidente la viscosidad en cualquier componente (*Albert Ibartz, 2011*). Además se puede atribuir el crecimiento de la viscosidad a las cadenas largas de ácidos grasos que presentan en su estructura el aceite o puede variar de acuerdo al grado de instauración, es decir a mayor número de doble enlaces, la viscosidad es menor, pero el aceite de higuierilla presenta una cantidad mínima por lo tanto su viscosidad es excesiva. (*Alton Bailey, 1995*).

Según [Yassin et al \(1991\)](#) estas son las condiciones óptimas para elegir un fluido base, y se aplicó el aceite de higuierilla para la evaluación:

Tabla 15. Resultado Evaluación aceite de Higuierilla

Aceite de Higuierilla	
Condiciones óptimas para elegir un fluido base	Calificación
Punto de Anilina > 65°C (145°F)	
Emulsión estable	NA
Viscosidad cinemática baja	
Flash point > 100°F	
Pour point < T ambiente	

Del cuadro anterior el color verde significa que aplica positivamente en variedad de situaciones, el color rojo que no cumple con la condiciones y NA significa no aplica por razones de la naturaleza del fluido de perforación que realizaremos (100% base aceite, en otras palabras sin emulsión).

La reología del aceite de higuera es presentada a continuación:

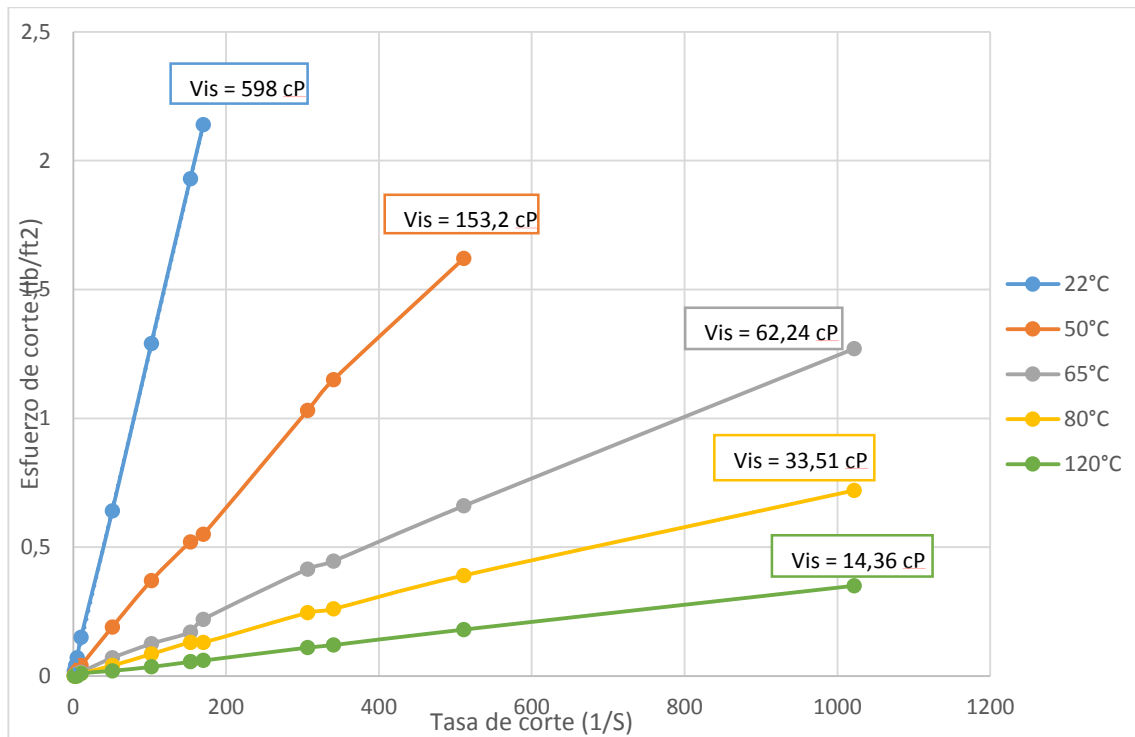


Ilustración 37. Reograma aceite de Higuera.

Esta prueba se realizó con un viscosímetro de 12 velocidades, sin embargo el aceite a 22°C y a 50°C poseía esfuerzos de corte superiores a 300 lb/100ft² en las lecturas de 600 rpm (1021,8 1/S). En el reograma presentado observamos el comportamiento newtoniano del aceite de Higuera.

6.3.2. Proceso de formulación y resultados.

Los tiempos de mezcla y orden de los aditivos son fundamentales en la formulación de lodos de perforación, por lo tanto se seguirán los siguientes tiempos y orden para cada aditivo presentado.



Tabla 16. Orden y tiempo de mezcla del proyecto.

ADITIVO	TIEMPO DE MEZCLA
Aceite	5 Minutos
Activador Polar	5 Minutos
Arcilla Organofílica	10 Minutos
Emulsificante	5 Minutos
Humectante	5 Minutos
Gilsonita / RDF	10 Minutos
Asfalto Liquido	10 Minutos
Grafito	10 Minutos
CaCO ₃	20 Minutos

Se empezó la formulación y la evaluación de los parámetros basándose en las sugerencias recibidas:

- Realizar envejecimiento a las muestras de lodo que obtengan un valor de cedencia $>$ a 10 lb/100ft², y presente una fuerza de gel que no permita la precipitación de sólidos.
- Calcular el balance de masa de cada formulación para una densidad específica.
- Realizar prueba de filtrado cuando se obtenga valores elevados de reología (sin decantación de sólidos en la muestra de fluido de perforación).



PROCESO DE FORMULACION DEL FLUIDO A BASE DE ACEITE DE HIGUERILLA

Tabla 17. Proceso de formulación de un fluido de perforación base aceite de higuera.

ADITIVO	FORMULACIONES, Concentración (Lb/bbl)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Arcilla Organofílica	10	14	20	8	8	8	12	8	14
Humectante	1	1	1	-	1	1	0,5	1	1
Emulsificante	1,5	1,5	1,5	-	1,5	2	2	2	1
Carbonato de calcio	109,41	109,41	109,41	-	0	109,4	109,41	109,41	120
Grafito	4	4	4	-	2	-	-	2	-
Asfalto líquido	6	6	6	2	-	-	-	6	-
Act 1 (Glicerina)	-	-	-	22	-	4	6	-	-
Act 2 (ACTIVFUL)	-	-	-	-	2	2	2	-	-
Act 3 (FYS I)	-	-	-	-	-	-	-	-	7
Act 4 (FYS II)	-	-	-	-	-	-	-	2	-
Gilsonita	-	-	-	10	10	12	12	-	14
IRF	-	-	-	-	-	-	-	-	12
Formulación, Volumen de aceite base (Bbl de aceite base / 1 Bbl de Lodo).									
Aceite de higuera	0,82	0,82	0,82	0,87	0,87	0,79	0,72	0,72	0,72
PROPIEDADES									
VP (Cp)	37	31	45,5	80	120	65	102	51	103
YP (lb/100 ft ²)	1	2	4	0	15	18	21	3	29
GEL 10 S	1,5	1,5	3	1,5	2,5	2	3	2	10
GEL 10 MIN	1,5	1,5	3	1,5	2,5	2	3	2	10

NOTA: A medida aumentan las temperaturas, disminuye la reología, es por tal razón que las propiedades mostradas anteriormente se hallaron a 80 °C. Solo la formulación 9 que fue la óptima en reología se realizó a las tres temperaturas recomendadas en este proyecto (65, 80 y 120 °C).



OBSERVACIONES:

Como se observa en las formulaciones 1, 2 y 3, no se notan resultados favorables con el aumento de la arcilla, además el filtrado HT-HP arrojó un valor incontrolable (50 ml).

La necesidad de elevar la reología direcciona el proyecto a probar 4 tipos de activadores que se tienen en el laboratorio y evaluar su efectividad.

Tabla 18. Activadores Polares usados en el proyecto

Activador de Prueba	Nombre
Activador 1	Glicerina
Activador 2	Activful
Activador 3	FYS I
Activador 4	FYS II

- En las formulaciones 4, 6 y 7 se probó la glicerina partiendo de algunas bibliografías que afirman que “Los activadores más comunes son el agua y la glicerina”⁸. con la idea de realizar lodos de emulsión inversa, algunas empresas han utilizado glicerina buscando el sustituto del agua, con el fin de no hidratar las arcillas.
- El valor de 22 lb/bbl de glicerina corresponde a 5%. se ha realizado adicionalmente pruebas con valores entre 0 y 10 % obteniendo resultados muy similares descartando el activador No. 1.
- El valor de ACTIVFUL respondió al aceite de higuera y a la arcilla elevando los valores de YP pero los geles siguen siendo bajos y hay una decantación de sólidos al momento de dejar estático el lodo.

- En la formulación 7 se prueba dos activadores (ACVTIVFUL y Glicerina) con una cantidad más alta de arcilla pero se observa que los geles no aumentan proporcionalmente al incremento de los aditivos en relación con la formulación 6. Además con ACTIVFUL se forma espuma en el lodo causando que las mediciones de densidad sean erróneas.
- El activador 2 en la formulación 8 no arroja resultados favorables en cuanto a YP y geles por lo tanto se procede a envejecer los fluidos que proporcionaron puntos cedentes relativamente buenos para observar el comportamiento reológico. A continuación se muestran dichas propiedades.

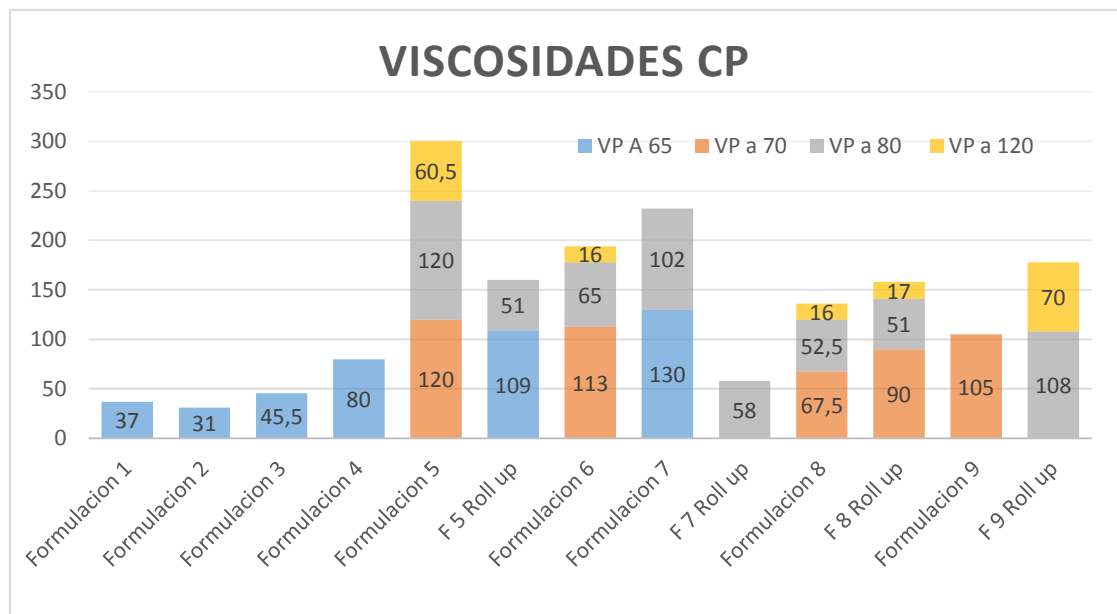


Ilustración 38. Viscosidades Plásticas diferentes formulaciones

- Es importante resaltar que los cambios en la viscosidad plástica con respecto a la temperatura son más sensibles en presencia de los diferentes aditivos, especialmente de los activadores polares, observando la tabla 19 podemos observar que la formulación 5 (Activful) en 10°C no hubo un cambio de VP, por



otra parte en la formulación 6 en 10°C hubo un cambio de un 42,48% de reducción de viscosidad.

- Aunque la mayoría de citas bibliográficas plantea que la glicerina es un excelente activador polar de arcilla organofílica, en este proyecto no fue la mejor, sus valores bajos de reología se pueden atribuir a la baja calidad de la glicerina, a la estructura química del aceite o simplemente a la incompatibilidad con el tipo de arcilla o aceite.
- El activador Activeful presenta buenos valores YP, pero bajos valores de geles por lo tanto no mantiene los sólidos suspendidos por mucho tiempo y se decantan, además la formación de una gran espuma superficial hace que los valores de densidad sean erróneos.
- Técnicamente las pruebas reológicas arrojaron que de los cuatro activadores usados, el mejor es el FYS I que proporciona la empresa fluidos y servicios correspondiente a la formulación 9 con valores de YP de 50, 24 y 10 lb/ft² para temperaturas de 72°C, 80°C, Y 120°C respectivamente. Y geles planos de 13, 11 y 8. De acuerdo a las citas bibliográficas consultadas, un lodo que sea 100% base aceite y tenga las condiciones anteriores, representa una excelente alternativa para realizar perforaciones donde no se requiera usar agua por las múltiples desventajas que esta conlleva (hinchamiento de arcillas, daño a la formación por emulsificante, etc).
- El objetivo de este proyecto radicaba en comparar el lodo a 65°C, 80°C y 120°C, pero el viscosímetro no marcaba su dial a la primera de las tres temperaturas mencionadas, esto es debido a la viscosidad que presenta el aceite, por lo tanto se proceden a tomar los valores al momento exacto en que el dial empieza a marcar los 600 RPM que es a una temperatura de 72°C.



PROPIEDADES (ROLL UP)	FORMULACIONES, Concentración (Lb/bbl)										
	5		6		7		8		9		
	65 °C	80 °C	72 °C	80 °C	72 °C	80 °C	72 °C	80 °C	72 °C	80 °C	120 °C
VP (Cp)	109	51	113	65	69	58	68	53	105	108	70
YP (lb/100 ft2)	14	8	19	18	18	14	5	1,5	32	24	10
Gel 10 Seg.	3	2	2	2	2,5	2,5	2	2	13	10	8
Gel 10 Min.	3	2	2	2	2,5	2,5	2	2	13	10	8
Filtrado HT-HP (ml)	62		60		65		INCONTROLABLE		50		

Tabla 19. Propiedades OBM Higuierilla formulaciones envejecidas a 300 °F y 100 psi

NOTA: en las formulaciones 6 a 9 la temperatura mínima a la que marcó el dial del viscosímetro fue 72 °C.

LODO OPTIMO: FORMULACION NO. 9

Tabla 20. Resultados formulación 9 (Envejecida).

PROPIEDAD	FORMULACION No. 9		
	72 °C	80 °C	120 °C
VP (Cp)	105	108	70
YP (lb/100ft2)	32	24	10
Gel 10 Seg	13	10	8
Gel 10 Min	13	10	8
Filtrado HT-HP (ml)	50		
Densidad (ppg)	9,8		
Estabilidad Eléctrica (W)	1999		



Ilustración 39. Fluido de perforación base aceite de higuierilla.



Observaciones:

- Con el activador polar FYS I no se genera espuma, por lo tanto se puede hallar su densidad sin ningún inconveniente.
- Al envejecer un lodo 100% base aceite de higuera, las propiedades reológicas disminuyen un poco pero siguen siendo aptas para realizar perforación.
- La formulación No. 9 fue la óptima en reología, estabilidad eléctrica y densidad, sin embargo el filtrado sigue siendo demasiado alto, por lo tanto se procede a realizar variaciones de los aditivos controladores de filtrados, en este caso se comprobó que el RDF (aditivo de tecnología de fluido no invasivo) es inerte en este tipo de fluidos.

Tabla 21. Aditivos y cantidades utilizadas para controlar filtrado en OBM de Higuera

ADITIVO	PRUEBAS-CONCENTRACIÓN (Lb/bb)						
	1	2	3	4	5	6	7
Gilsonita	-	-	-	-	6	14	10
CaCO3 malla 600	-	-	-	-	-	-	60
CaCO3 malla 400	-	-	-	-	-	-	60
Asfalto Liquido	2	8	-	-	-	-	-
Asfalto Solido	-	-	2	6	6	-	-
IRF	-	-	-	-	-	12	-
Filtrado HT-HP (ml)	>50	>50	>50	>50	>50	>50	30
Filtrado PPT (Campo Acacias) ml	-	-	-	-	-	-	29

Nota: Los valores de las pruebas de filtrado son el resultado de la multiplicación del volumen recolectado por dos (x2) con el objeto de aguantar y resistir una máxima presión de trabajo de 10.000 psi, la celda HT-HP se diseñó con un área transversal igual a la mitad de la celda API estándar.

Por otro lado, la prueba de filtrado PPT o prueba de taponamiento de permeabilidad mide una “pérdida instantánea” y una pérdida de filtrado de 30 minutos a presiones



muy altas y temperaturas muy elevadas. Consta de un disco de cerámica que reemplaza el papel filtro tradicional cuya permeabilidad y porosidad va de acuerdo a las propiedades de un pozo en específico, en este caso uno perteneciente al campo acacias.

Un filtrado de 30 ml como el que dio en la prueba 7 sigue siendo alto, por esta razón se procede a hacer una nueva prueba con una mezcla de mallados diferentes.

Tabla 22. Formulación Óptima OBM de Higuierilla 10 ppg.

Formulación Óptima 10 ppg	
Componente	Concen. (lb/bbl)
Aceite Higuierilla	0.8
Arcilla Organ.	14
Humectante	1
Emulsificante	2
FYS I	7
Gilsonita	10
CaCO ₃	120

El carbonato tiene una distribución de mallas 400 y 150. Se el mejor resultado con esta mezcla de mallas.

Tabla 23. Filtrado HTHP Diseño 10 ppg Lodo óptimo

Resultado prueba retorta HTHP - Diseño 10 ppg	
Instantáneo	
	0,1 mL
5	0,2 mL
10	0,2 mL
15	0,2 mL
20	0,1 mL
25	0,1 mL
30	0,0 mL
Total	0,9 mL
Calculado (Total x 2)	1,8 mL

El valor calculado se realiza para un diferencial de presión de 1000 psi.



Para tener más información sobre las propiedades reológicas que puede tener un lodo base aceite de higuera se formuló un fluido con una densidad menor (9 ppg), para estudiar su comportamiento en presencia de una menor cantidad de sólidos. De igual manera se utilizara la misma mezcla de mallas (400 y 150) para el CaCO₃ (Carbonato de calcio), ya que esta proporción arroja los mejores resultados de filtrado. Se le llamara Diseño 2 al fluido con una densidad de 9 ppg.

DISEÑO NO. 2

Tabla 24. Formulación y resultados OBM de Higuera Diseño 2 (9 ppg).

ADITIVO	Con. (Lb/bbl)
Aceite de higuera	0,72
Arcilla Organofilica	12
Humectante	1
Emulsificante	2
OT I	7
Gilsonita	10
CaCo3 malla 150	32,5
CaCo3 malla 400	32,5
PROPIEDADES	
VP (Cp)	108
YP (lb/100ft ²)	11
YS (lb/100ft ²)	2
Gel 10 Seg.	4
Gel 10 Min.	4
Filtrado HT/HP (ml)	2,0
Densidad (ppg)	9

Se realiza envejecimiento a 300 °F y a 100 Psi de presión arrojando los siguientes resultados:

Tabla 25. Resultados OBM Diseño 2. Envejecimiento

Envejecimiento (roll up)	
PROPIEDADES	
VP (Cp)	111
YP (lb/100ft ²)	18
YS (lb/100ft ²)	4
Gel 10 Seg.	5
Gel 10 Min.	5
Filtrado HT/HP (ml)	2,0

Para un total de 1 ml, con filtrado calculado de 2,0 ml. El cake formado es delgado (1/32”), flexible y semipermeable, un cake ideal para operaciones de perforación.

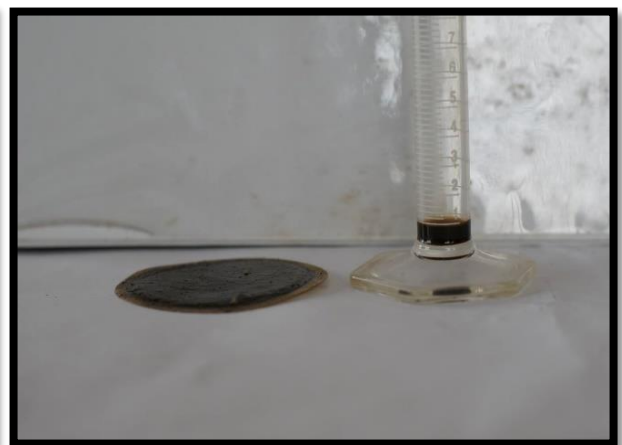


Ilustración 40. Filtrado OBM 30 mL Diseño 1. Ilustración 41. Filtrado OBM 1,9 mL Diseño 1.

Ambos diseños (OBM de Higuerrilla 1 y 2) tienen propiedades reológicas deseadas para este proyecto de investigación.

Para materializar la evaluación técnica del lodo se recurrió al cálculo del índice de acarreo (CCI –Carrying Capacity Index), según algunos de los manuales utilizados como bibliografía en este trabajo (M.I. SWACO, BP, Drilling Fluids Processing Handbook), un $CCI > 1$ indica una buena limpieza del hueco.

Se utilizaron las siguientes fórmulas para hallar este parámetro:



$$CCI = \frac{\rho(\frac{lb}{gal}) * K * Veloc. Anular (\frac{Ft}{min})}{400,000} \quad (9)$$

$$K = \theta_{300} * 511^{1-n} \quad (10)$$

$$n = 3,32 * Log \left[\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right] \quad (11)$$

$$Veloc. anular = \frac{24,51 * Caudal (\frac{Gal}{Min})}{\phi_{Hole}^2 - \phi_{DP}^2} \quad (12)$$

Cuando evaluemos el CCI tengamos en cuenta que:

- Un CCI de 0,5 o menor indicaría una mala limpieza de pozo.*
- Un CCI de 1,0 o mayor indicaría una buena limpieza de pozo.*

Esta información puede variar según casos específicos, todo basado en el conocimiento que se tenga sobre el campo, y las anteriores perforaciones. En el caso de la formación Carbonera en campos como Cusiana y Cupiagua la experiencia perforando esta difícil formación ha dejado un historial que recomienda para OBM un CC>0,8 y para WBM >1,0.

Los cálculos de la formulación 9 con cambios en los aditivos para el control de filtrado son:

Tabla 26. Evaluación OBM Higerilla Formulación opti¹ma Diseño 1

Densidad de 9,8 lb/Gal		Densidad de 10 lb/Gal	
Formulación 9 a 72°C		Formulación 9 a 72°C	
N	0,855593701	n	0,855593701
K (Cp)	388,8392748	K (Cp)	388,8392748

¹ Metodo extraido de Drilling Fluids Processing Handbook GPP. ASME Shale Shaker.



Velocidad Anular	176,384	Velocidad Anular	176,384
CCI	1,7	CCI	1,7
Formulación 9 a 80° C		Formulación 9 a 80° C	
N	0,85710913	n	0,85710913
K (Cp)	324,2352666	K (Cp)	324,23526661
Velocidad Anular	176,384	Velocidad Anular	176,384
CCI	1,4	CCI	1,4
Formulación 9 a 120°C		Formulación 9 a 120°C	
N	0,906364223	n	0,906364223
K (Cp)	143,448193	K (Cp)	143,448193
Velocidad Anular	176,384	Velocidad Anular	176,384
CCI	0,6	CCI	0,6

Se calcularon CCI con densidades de 10 lb/gal, para tener un precedente de la afectación de la densidad en este valor. El diseño del pozo y la sarta (diámetros) se encuentra en el ANEXO C.

Se utilizó un caudal de 900 Gal/min, teniendo como este valor de Galonaje el máximo según HALLIBURTON DRILLING MANUAL.

Se construyó el perfil de corte (Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte), para su evaluación y observar sus tendencias.

ROBINSON L. et al, 2001 propuso que se calculara el índice de acarreo con el producto de los parámetros que pueden ser controlados moviendo los sólidos que tiene el pozo. Una Investigación de 10 años proporciono la data para proponer que la multiplicación de la velocidad anular (ft/min), el peso del fluido (ppg) y K (Ley de la potencia) (Cp) era superior o igual a 400,000 los sólidos tendrían características físicas que garantizarían la limpieza del pozo, si el producto de estos tres parámetros tendría un valor de 200,000 los sólidos tendrían tendencias redondeadas, toda esta información se tomó de muestras de sólidos recolectadas de las zarandas vibratorias.

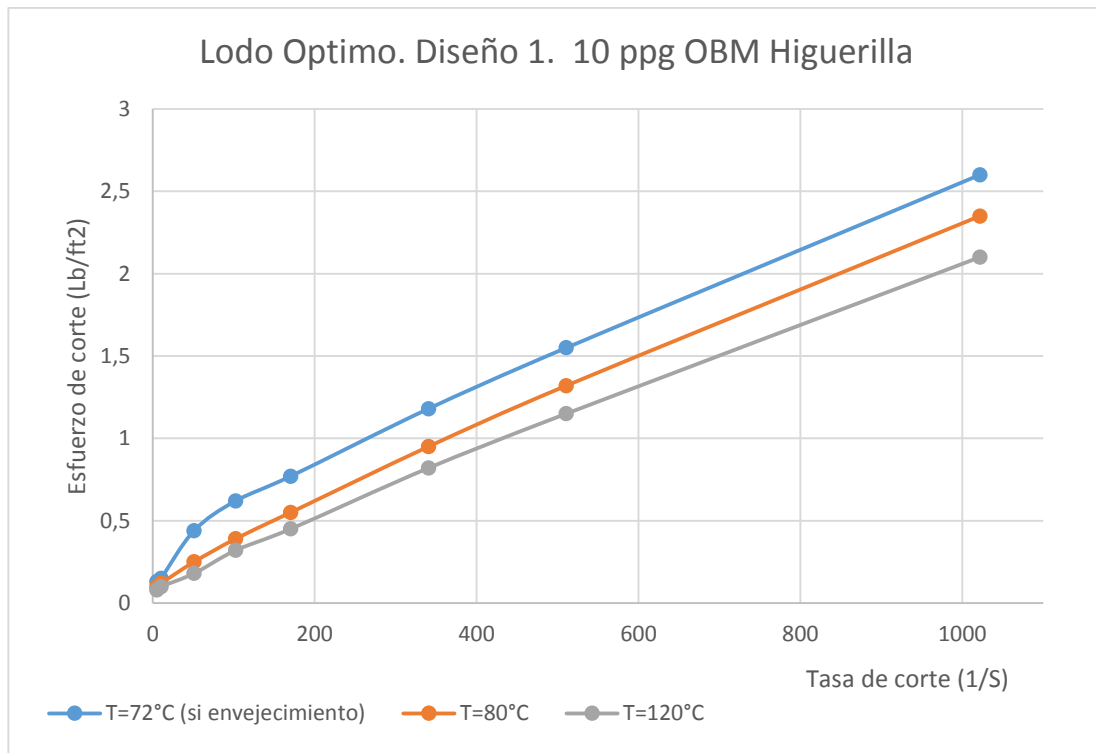


Ilustración 42. Reograma Lodo Óptimo. Diseño 1. 10 ppg OBM Higuera

En el diseño 1, la densidad debe llegar a 10 ppg, pero el 9,8 manifestado en los resultados se podría atribuir a la aparición de burbujas que junto a la alta viscosidad del aceite que evitan que salgan del fluido. Sin embargo se rectificó el balance de masa para 10 ppg. Una balanza presurizada daría una medición más confiable de la densidad.

El lodo óptimo presentó un CCI (índice de capacidad de acarreo) de 1,7 y 1,4 a 72°C y 80°C respectivamente. Estos valores por encima de 1 proporcionan una buena limpieza del pozo. Es importante resaltar que estos cálculos fueron realizados asumiendo en la perforación una sección de 12 ¼ pulgadas.

La evaluación del índice de acarreo CCI para el diseño 2 es el siguiente:



YP	18
Densidad	9,2
n	0,8956827
K	247,24344
CCI	1,0

PRUEBA DE LA RETORTA

La prueba de la Retorta presento los siguientes datos :

- 74 % de líquido y 26 % de sólidos.
- El líquido tiene tonalidades diferentes, lo que puede ser evidencia de degradación del aceite, coloratura del activador mezclada con una fracción del aceite, o pueden ser las dos opciones.
- El aceite puede tener una cantidad mínima de agua, por proceso de extracción y demás, el activador polar es un aditivo líquido, al igual que el emulsificante y el humectante, por esta razón es difícil diferenciar un posible cambio.

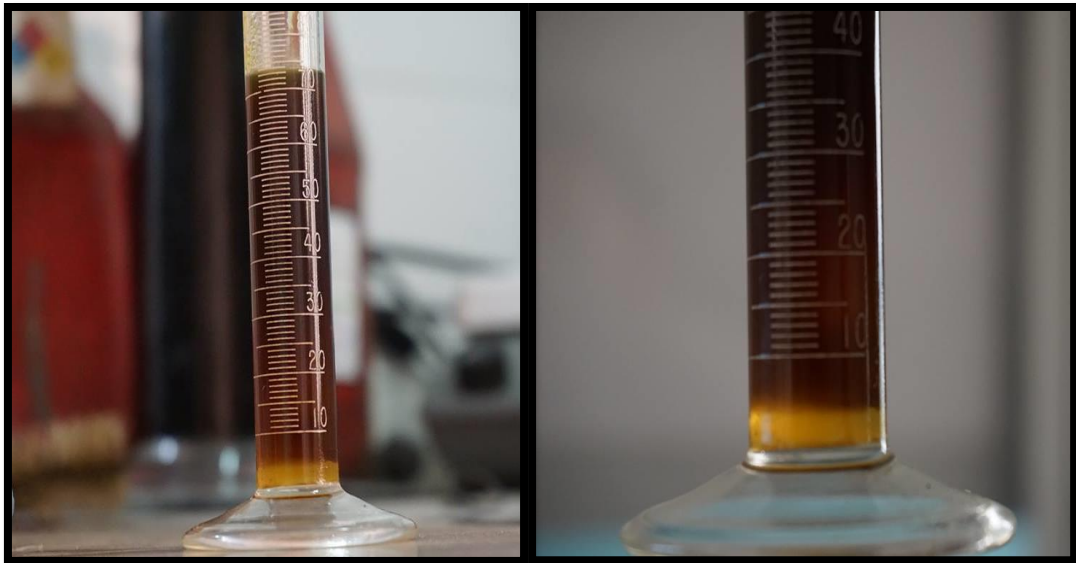


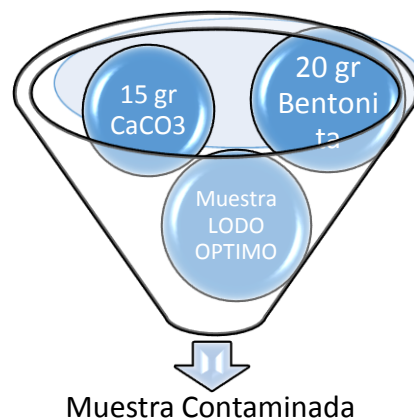
Ilustración 43. Resultado OBM Higuierilla-Prueba de retorta



La prueba de la retorta llegó a un máximo de temperatura de 411°C (772°F), según Perez Conesa 2009, los triglicéridos empiezan a descomponerse a los 260°C (500°F), sabiendo que el aceite de higuerilla está compuesto de triglicéridos y que la temperatura de descomposición fue sobrepasada hay la posibilidad de que el aceite al evaporarse y condensarse nuevamente la integridad o estructura química cambie. En la figura 18 se muestra un fluido con dos tonalidades diferentes; el fluido en la parte superior con una tonalidad café oscuro y en la parte inferior posee una apariencia similar a el aceite de higuerilla en condiciones normales, lo que nos lleva a pensar que en efecto pudo ocurrir una descomposición o degradación del aceite debido a la alta temperatura.

Por último cumpliendo con uno de los objetivos del proyecto, que es medir el comportamiento del lodo contaminado con sólidos. Inicialmente se había considerado contaminar la muestra con arena de diferente granulometría, sin embargo es común que el equipo de control de sólidos separe muchas de las partículas del tamaño arena, por otra parte los sólidos finos que están recirculando en el sistema pueden ser un contaminante de mayor cuidado en el comportamiento reológico del lodo.

Se eligió como contaminante una mezcla de CaCO₃ (Carbonato de calcio) malla 400 y Bentonita.





Al medir reología se encontró que el dial no tenía valores por debajo de 300 hasta los 100°C, por lo tanto se agregó 0,5 ml WA (agente humectante) y la lectura se tomó a 87°C, luego se agregó 1 ml (2,5 ml de WA en total en la muestra), y la lectura se pudo hacer a 77°C.

Tabla 27. OBM Higuierilla Prueba Contaminación con Sólidos

LODO DEFINITIVO CONTAMINADO			
PROPIEDAD	LODO A 80 °C SOLO	LODO A 87 °C + CONTAMINACIÓN (15g CaCO3 malla 400 y bentonita 20 g)	LODO A 77 °C + CONTAMINACIÓN (15g CaCO3 malla 400 y bentonita 20 g)
VP	98	100	93
YP	22	51	74
Densidad	9	9	9
N	0,860793822	0,73271329	0,638292831
K	285,8973753	799,6535289	1593,572135
CCI	1,3	3,2	6,3
Gel 10 sg	12	40	27
Gel 10 min	12	40	27

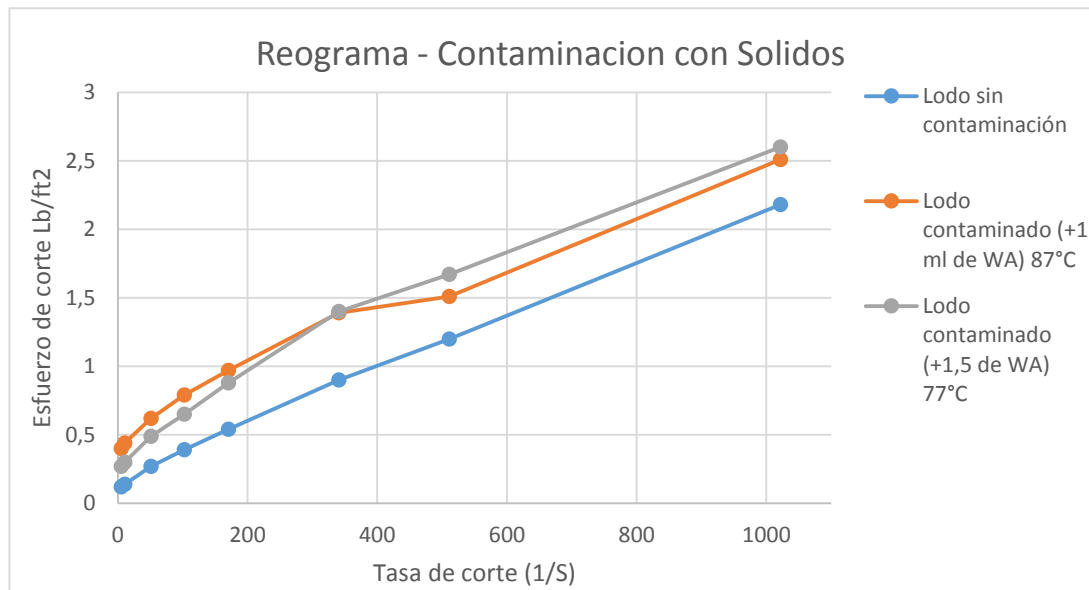


Ilustración 44. Reograma OBM Higuierilla Diseño 1 contaminado con sólidos.

En los resultados de la contaminación del OBM de higuierilla por sólidos (carbonato de calcio y bentonita) se observa un evidente incremento de las propiedades

reológicas. Por esta razón se procedió a aumentar periódicamente cierta cantidad de humectante, esto con el fin de reducir los efectos de la contaminación y hacer posible la lectura en el dial a una menor temperatura. La adición de este componente hace que poco a poco los sólidos incorporados al lodo se humecten de aceite y se incorporen al fluido, es por este motivo que en ciertas operaciones de perforación se debe estar agregando humectante al lodo para evitar que sus propiedades reológicas sean excesivas si se prevé una contaminación con sólidos.

De la misma forma se procedió a contaminar diferentes muestras de lodo con CEMENTO y AGUA en bajos porcentajes, asumiendo buenas practicas operacionales por parte del equipo de perforación y cementación.

Se contamina con agua no salina en las proporciones de 1%, 2% y 3%, asumiendo un 3% como valor máximo de contaminación por efectos variables como: ingreso de agua de formación, errores en manipulación de tanques en superficie, lluvia, etc. Con el fin de evaluar la reología de los diseños presentados en este trabajo se contamina las dos muestras y se obtuvo los siguientes valores:

DISEÑO1:

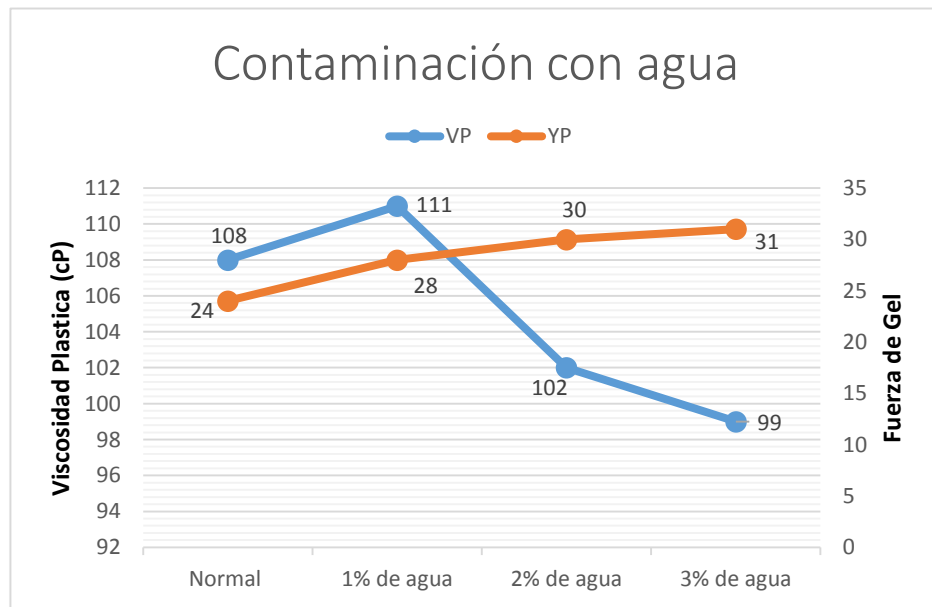


Ilustración 45. Prueba de contaminación con agua no salina a OBM de Higuera (Diseño de 10 ppg).

Según las Ilustraciones 45 y 46, se puede ver claramente el incremento del YP, debido a la contaminación con agua, sin embargo este cambio no es alto, lo que muestra la efectividad del emulsificante de capturar las gotas de agua y que el fluido contaminante se comporte como sólido y no afecte de manera significativa las propiedades del lodo. La circulación constante perforando y las altas temperaturas manejadas evaporaran eventualmente las gotas de agua dispersas en el lodo.

La estabilidad eléctrica manifestada en 1999 Voltios para un lodo 100% base aceite es muy buena, lo ideal es mantenerla por encima de 400 voltios para que al momento de una posible contaminación con agua, la emulsión siga siendo estable.

DISEÑO 2:

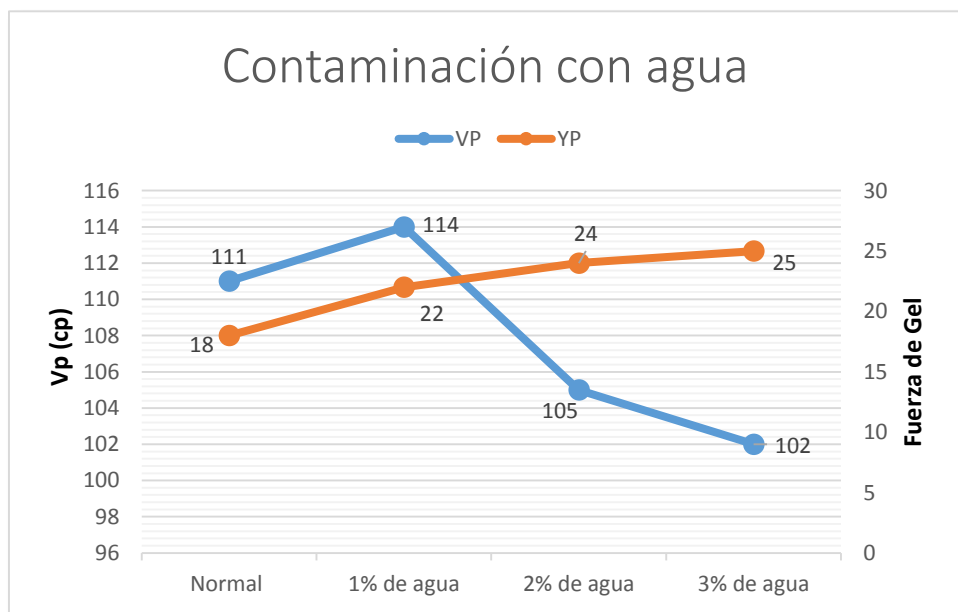


Ilustración 46. Prueba de contaminación con agua no salina a OBM de Higerilla (Diseño de 9 ppg).

Los valores de Gel en los dos diseños no se vieron afectados por la contaminación, el YS permaneció contante.



Se midieron las estabildades eléctricas a la contaminación del lodo base aceite de Higuierilla encontrando que la estabilidad de la emulsión sigue siendo buena y no afectaría de esta manera la reología de manera significativa, afirmación que se respalda con los resultados de reología

% Contaminación	Estabilidad Eléctrica
1%	1960
2%	1919
3%	1887

Por otra parte un contaminante que afecta notablemente la reología del fluido de perforación es el cemento, a pesar de existir fluidos que no permiten que se mezclen este y el lodo como lo son el: (1) Espaciador y (2) Lavador, existen circunstancias en operaciones de bajada de Casing y cambio de sección donde puede ocurrir este tipo de contaminación.

Diseño 1:

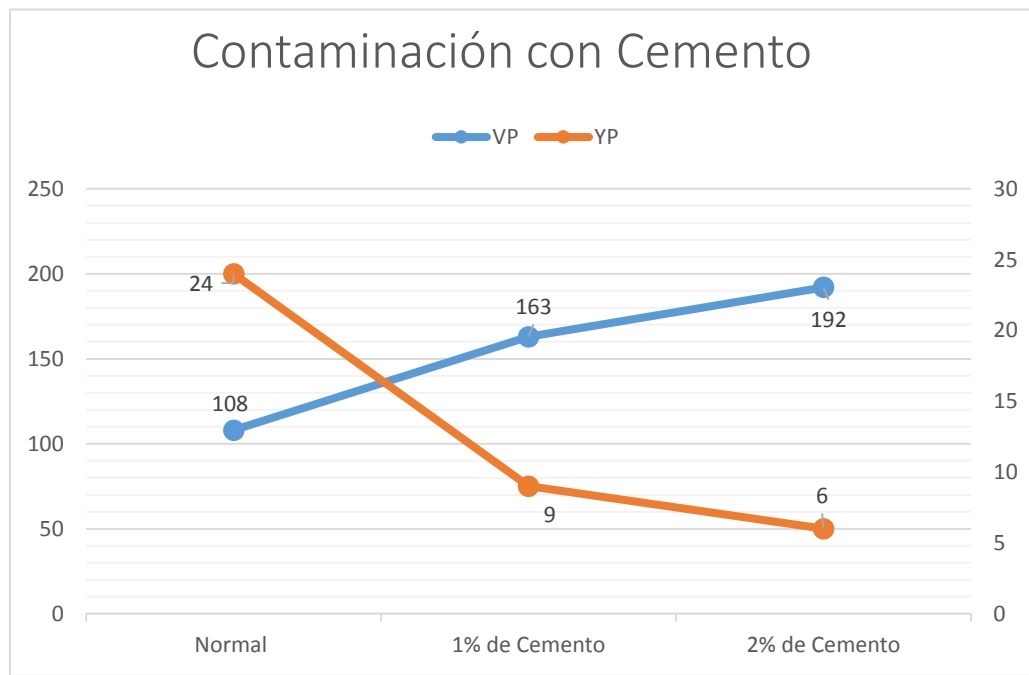


Ilustración 47. Prueba de contaminación con Cemento a OBM de Higuierilla (Diseño de 10 ppg).

Diseño 2:

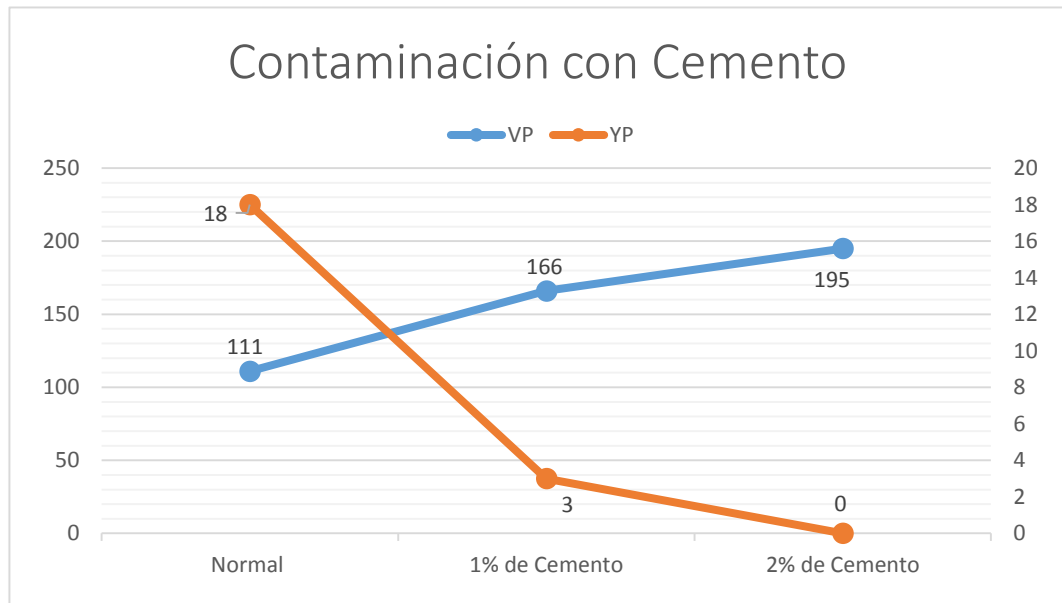


Ilustración 48. Prueba de contaminación con Cemento OBM de Higerilla (Diseño de 9 ppg).

Los valores de Gel al igual que el YS no presentan cambios, sin embargo los dos diseños presentaron una decantación de sólidos es excesiva, como se muestra a continuación:



Ilustración 49. Decantación de sólidos debido a la contaminación con cemento diseño 2.



Debido a la información encontrada sobre los aceites vegetales y en especial, el mantenimiento de sus propiedades reológicas, se tomó la decisión de realizar una prueba de resistencia al envejecimiento, el cual consiste en el envejecimiento del fluido por 5 días continuos, tomando datos de reología en cada uno de los días. Se realizó el envejecimiento del lodo según la norma API13i a 300°F y 100 psi.

El diseño 2 a diferencia del diseño 1 no puede mantener valores aceptables de reología frente a la contaminación con cemento, se le atribuye a sus propiedades reológicas mas bajas, para combatir este problema la rápida adición de humectante es fundamental en el mantenimiento de las propiedades del fluido en las operaciones de perforación.

El comportamiento del lodo base aceite de higuera en la prueba de resistencia al envejecimiento fue el siguiente:

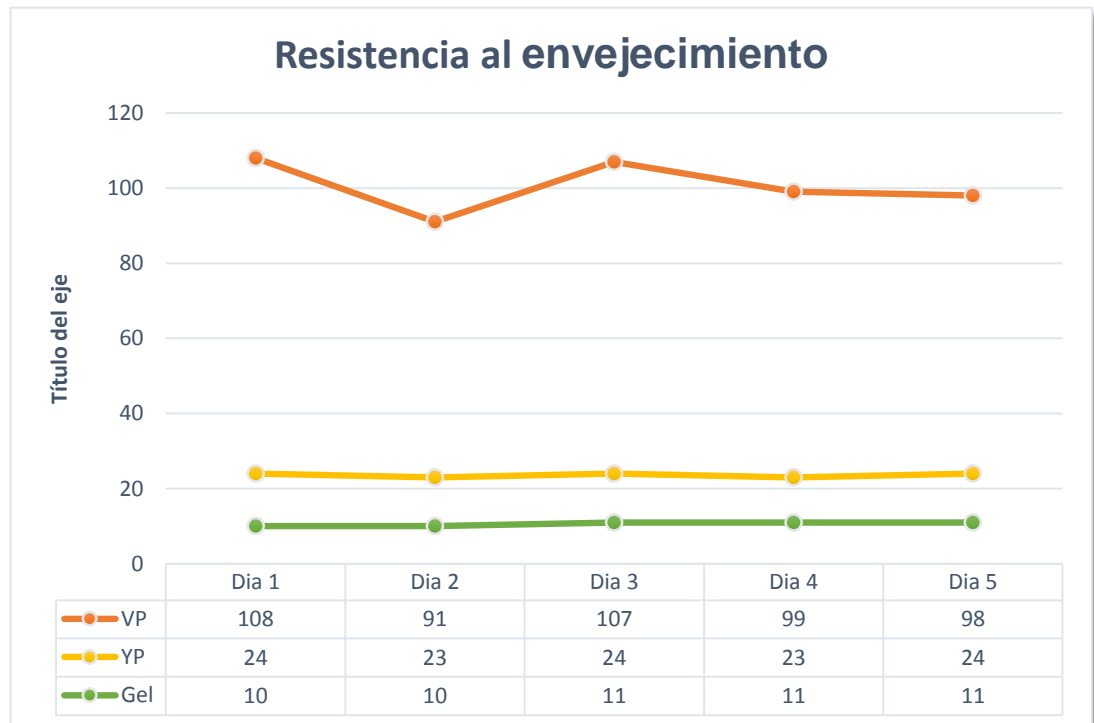


Ilustración 50. Prueba de envejecimiento y seguimiento durante 5 días.



Las pruebas reológicas fueron realizadas a 72°C (161°F).

La prueba fue realizada únicamente al DISEÑO 1 debido a que la formulación base es muy similar, la única variable es el material densificante, un sólido inerte, por lo tanto el funcionamiento de los otros aditivos (arcilla, activador, etc) debería tener el mismo comportamiento.

La prueba de resistencia al envejecimiento, es una evidencia clara de la estabilidad del lodo, por lo tanto esta prueba probaría la resistencia del lodo a temperatura y presión de manera constante por un largo periodo de tiempo, sin tener cambios significativos en sus propiedades.

PRUEBAS NO CONVENCIONALES: OFITE 77

El Viscosímetro OFI 77 es un equipo automático diseñado por OFITE Inc., en semejanza al fabricado por *Fann Instruments Company*, FANN 70 / 75 el cual está basado bajo el desarrollo de “The Sandia National Laboratories”.

Este equipo fue creado para determinar las propiedades de flujo de los fluidos de perforación a presiones y temperaturas elevadas.



Ilustración 51. Equipo OFITE 77. Viscosímetro HT-HP.



El equipo presuriza mediante un aceite hidráulico que está en constante contacto con el fluido de perforación, y eleva la temperatura de la muestra de fluido de perforación mediante una camisa de calentamiento gradual. Posee un sistema de refrigeración para el “cool down” donde el fluido para enfriamiento es agua.

Para la realización de la prueba debe hacerse una prueba de compatibilidad del fluido de perforación con el fluido de confinamiento del equipo, con el fin de saber si se formarían emulsiones, las cuales podrían dañar el equipo.

El resultado fue el siguiente:



Ilustración 52. Prueba de compatibilidad OBM de Higuera y Fluido de confinamiento.

Como se observa en la imagen los fluidos presentan una buena prueba de compatibilidad, mostrando dos fases líquidas, el lodo de perforación y el aceite de confinamiento.

La prueba realizada arrojó el siguiente perfil del lodo a las diferentes condiciones.

**Reograma con Viscosímetro HPHT
Aceite de Higuierilla @ 9.2 ppg**

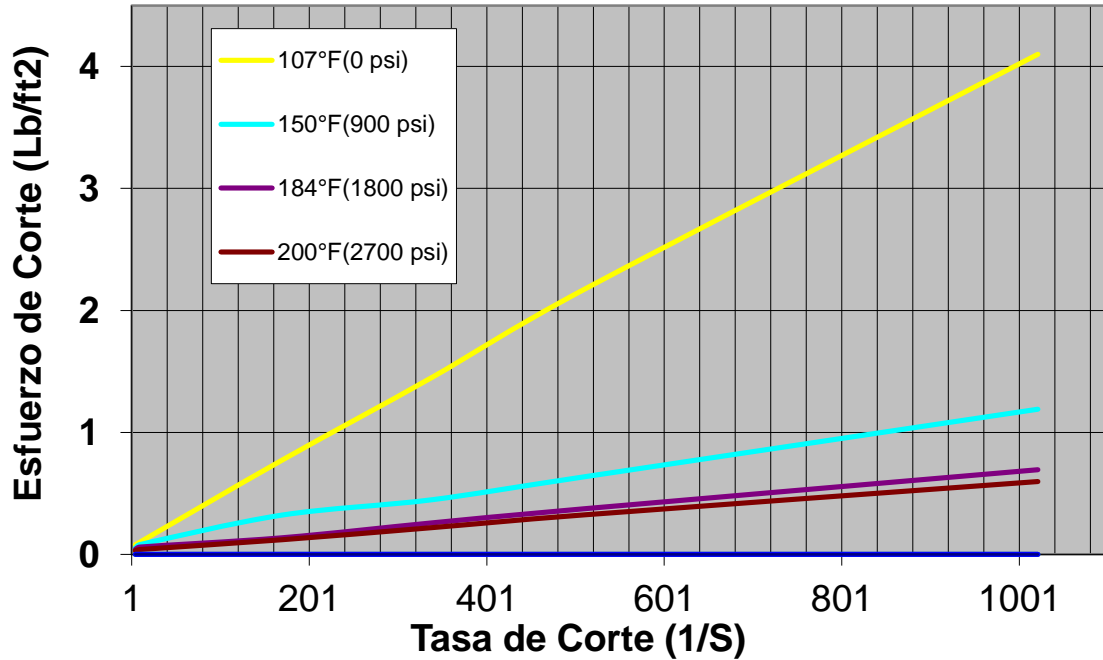


Ilustración 53. Reograma con Viscosímetro HPHT OFI 77 – OBM Higuierilla.

Los datos presentados son los correspondientes a la etapa de calentamiento (Heat up).

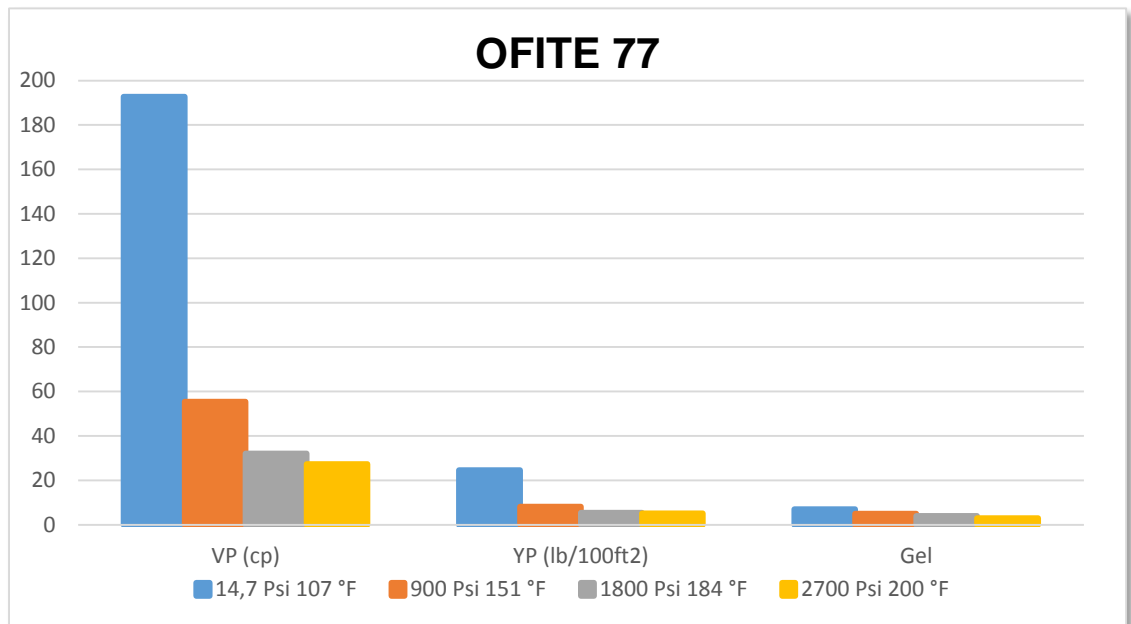


Ilustración 54. Valores Reológicos OBM Higuierilla- OFITE 77.

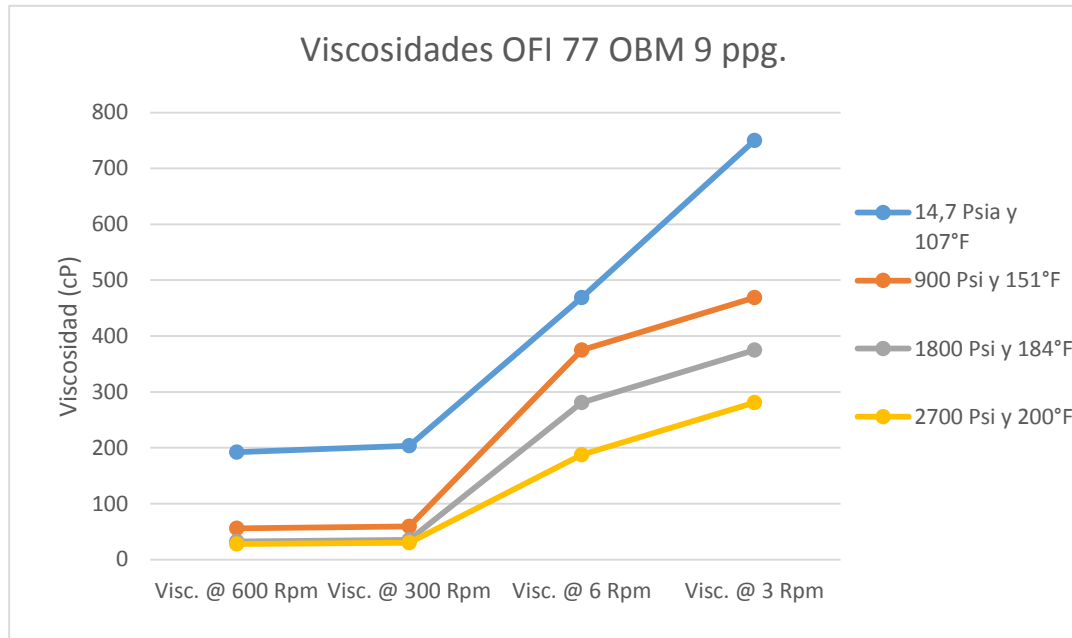


Ilustración 55. Viscosidades a diferentes tasas de corte-OFITE 77 OBM Higuera

Como se observa en la ilustración 55 el fluido de perforación reduce su viscosidad cuando se aplica presión y temperatura, la presión crea un cambio en la tendencia de las viscosidades a bajas tasas de corte, en la ilustración las condiciones con presión (900, 1800 y 2700 psi) tienen un comportamiento similar, sin embargo a presión atmosférica su tendencia es diferente.

La prueba correspondiente a la prueba OFITE 77 arrojó evidencias de la disminución en la reología a medida que aumenta la temperatura y presión, sin embargo el valor que se ve mayormente afectado es la viscosidad plástica, mientras que el YP y fuerza de gel sufren cambios menores. Operacionalmente el YP y la fuerza de Gel son las propiedades de mayor importancia, que generaran seguridad o riesgo en las operaciones de perforación, mientras que la viscosidad plástica es una propiedad que limita el movimiento del fluido, y entre menor esta sea las bombas necesitaran menos energía para circular, por esta razón los resultados obtenidos se calificaron positivamente. Es importante resaltar que el fluido al disminuir la Temperatura y presión volverá a adquirir sus propiedades iniciales,

entre ellas su alta viscosidad, por esta razón debe enfatizarse en los métodos para la reducción de viscosidad como la que se presentó en este trabajo.

Los reogramas de avance del proyecto son importantes, por esta razón se mostrara cual fue el cambio que se tuvo con los dos diseños con respecto al reograma del aceite tomado en los primeros pasos de este estudio.

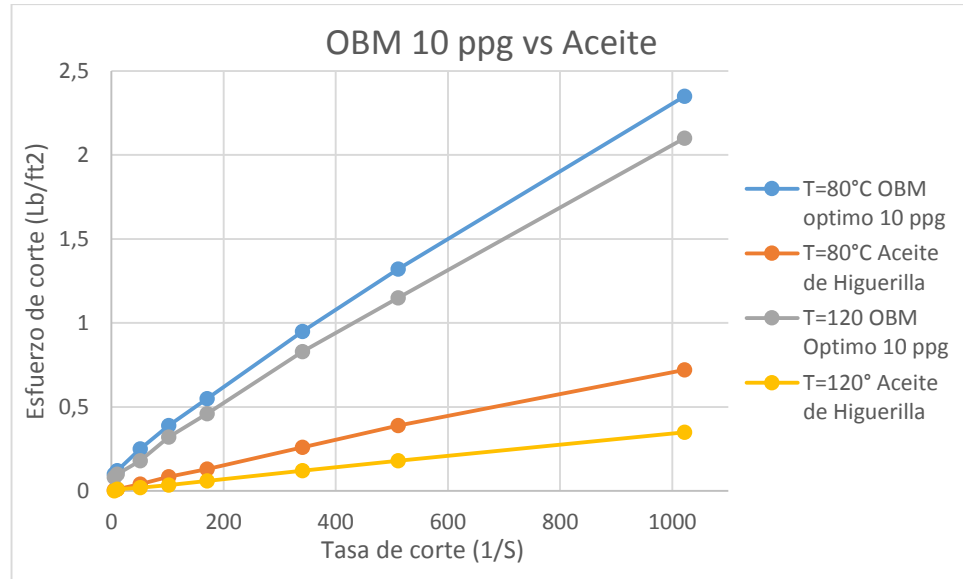


Ilustración 56. Reograma OBM 10 ppg Higuierilla optimo y aceite de Higuierilla.

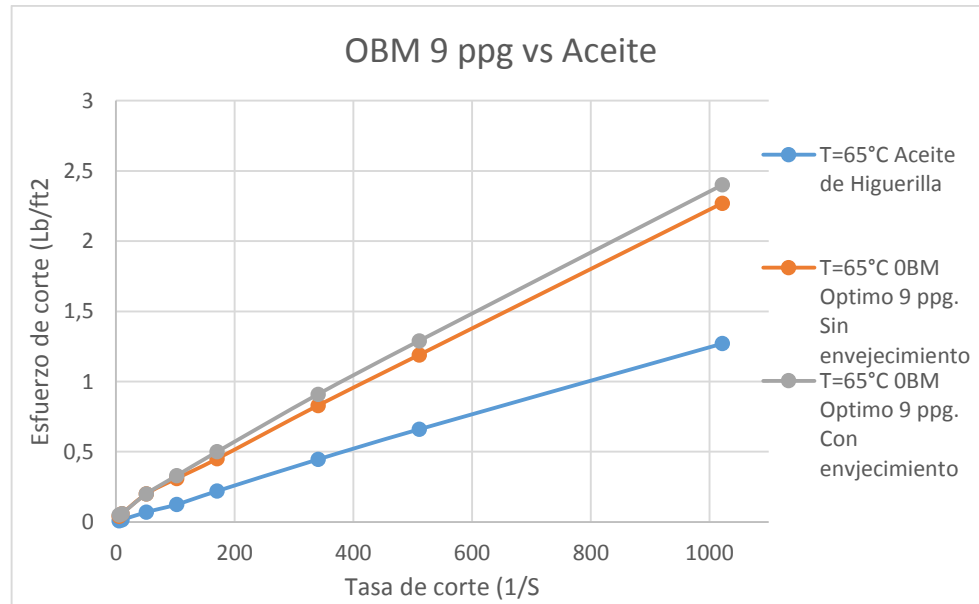


Ilustración 57. Reograma OBM 9 ppg Higuierilla optimo y aceite de Higuierilla.



HIDRÁULICA DEL OBM DE HIGUERILLA DISEÑO 1 Y 2.

Esta parte hidráulica fue realizada con el fin de calcular cuanta presión se necesita para bombear el fluido de perforación base aceite de Higuierilla.

Los datos y el programa para realizar la corrida son:



Bit Diameter	8.5 in
MD Out	6000 ft

Diseño 1 (72°C)

Para el galonaje según recomendaciones se utiliza 40 veces el diámetro de la broca para la sección que se desee.

DATA INPUT		CASING/LINER/RISER/OPEN HOLE			NOZZLE	MANUAL	AUTO
Mud Weight	10 ppg	Components	ID (in)	To (ft)	1	12	12
PV	103 cp	Casing	9	900	2	12	12
YP	29 lb/100ft ²	Open Hole	9	5100	3	12	12
Fluid Model	Bingham - "Oil Based Fluid"				4	12	12
Flow Rate	360 gpm				5	12	12
Max. Pump Press.	4273 psi				6	12	12
Surface equip.?	2				7	12	12
Motor bypass?	0%				8		
TVD?	5800 ft				9		
# of Nozzle (≤10)	7				10		

Ilustración 58. Data de entrada HIDRAULICA OBM higuierilla D1.

La máxima presión de la bomba depende del tipo de bomba que se tenga y la camisa que se esté usando, para este propósito se eligió la bomba Gardner Denver PZ9 (PZJ)⁵⁴, seleccionando un pistón de 5,5 in, lo cual nos da una presión máxima de operación de 4273 psi.

Los resultados de los cálculos realizados fueron:

BIT HYDRAULIC DATA		PRESSURE LOSS SUMMARY	
Min. TFA	0,3015 in ²	Drill String	2584,00 psi 81,79 %
Total TFA	0,7731 in ²	Annulus	320,88 psi 10,16 %
Jet Velocity	149,47 ft/s	Surface	54,70 psi 1,73 %
Press. Drop	199,68 psi	Special*	0,00 psi 0,00 %
Bit Hyd. Power	41,94 hp	Bit	199,68 psi 6,32 %
H. S. I.	0,7391 hp/in ²	Calculate	
Impact Force	278,51 lbf	Total/SPP	3159,26 psi 100,00 %
ECD	11,06 ppg		

Ilustración 59. Cálculo de HIDRAULICA OBM higuierilla D1.



A la derecha se muestran las caídas de presión que debe vencer el fluido para llegar a fondo (no se coloca la casilla especial ya que no hay motor en la sarta). Como se observa en los cálculos de hidráulica del diseño 1, la bomba mencionada sería teóricamente capaz de bombear el fluido hacia el pozo.

Diseño 2:

DATA INPUT		CASING/LINER/RI/SER/OPEN HOLE			NOZZLE	MANUAL	AUTO
Mud Weight	9,2 ppg	Components	ID (in)	To (ft)	1	12	12
PV	111 cp	Casing	9	900	2	12	12
YP	18 lb/100ft ²	Open Hole	9	5100	3	12	12
Fluid Model	Bingham - "Oil Based Fluid"				4	12	12
Flow Rate	360 gpm				5	12	12
Max. Pump Press.	4273 psi				6	12	12
Surface equip.?	2				7	12	12
Motor bypass?	0%				8		
TVD?	5800 ft				9		
# of Nozzle (≤10)	7				10		

Ilustración 60. Data de entrada HIDRAULICA OBM higerilla D2.

Es importante resaltar que los datos del diseño 2 son tomados a 65°C. Se utiliza los mismos datos que para el cálculo de hidráulica para el diseño 1.

BIT HYDRAULIC DATA		PRESSURE LOSS SUMMARY	
Min. TFA	0,2661 in ²	Drill String	2412,16 psi 82,99 %
Total TFA	0,7731 in ²	Annulus	260,26 psi 8,95 %
Jet Velocity	149,47 ft/s	Surface	50,33 psi 1,73 %
Press. Drop	183,71 psi	Special*	0,00 psi 0,00 %
Bit Hyd. Power	38,59 hp	Bit	183,71 psi 6,32 %
H. S. I.	0,6800 hp/in ²	Calculate	
Impact Force	256,23 lbf	Total/SPP	2906,46 psi 100,00 %
ECD	10,06 ppg		

Ilustración 61. Cálculo de HIDRAULICA OBM higerilla D2.

Claramente el diseño 2 requiere menos presión para ser bombeado, ya que sus pérdidas de presión son menores que las del diseño 1.

DRILL STRING DATA							
Drill String Components	OD	ID	Tool Joint		Length	Cap.	Pressure Loss
	in	in	OD	ID	ft	bbls	psi
Drill Pipe (S)	5	3	5	3	5305	46,38	1776,28
Heavy Weight Drill Pipe	5	3	5	3	450	3,93	150,67
Drill Collar	6	2	4,75	2	30	0,12	66,83
Jar	5	3	5	3	32	0,28	10,71
Drill Collar	6	2	4,75	2	180	0,70	400,98
Sub	4,75	2	4,75	2	3	0,01	6,68

Ilustración 62. Diseño de Sarta para cálculo Hidráulico.



6.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Como se mostró en la tabla evaluación económica (Tabla 12) se necesita un precio por barril de aceite base, y si este es demasiado alto afectara directamente al posible caso de negocio que puede llegar a presentar una empresa a una convocatoria de perforación.

6.4.1. Precio del aceite.

Sensibilidades precio y volumen aceite de higuera

El aceite de higuera es relativamente nuevo en el mercado, por lo tanto no se tiene registros claros de la historia de los precios, esto y su elevado precio (337 USD/bbl) genera una necesidad de realizar sensibilidades de posibles precios competitivos realizando estrategias de negociación de grandes volúmenes de fluido y avance tecnológico por parte de las empresas que dotaran del fluido base, siempre buscando un escenario de ganancia para todos los entes implicados en el proyecto.

Para realizar el proceso de comparación es posible guiarse por los precios históricos del aceite de palma, un fluido que es cada día más utilizado en diferentes industrias y ha pasado por el proceso de tecnificación del procedimiento de extracción del aceite para venderlo en el mercado.

Se presenta una comparación de los precios del aceite de palma y los aceites que tienen relación con los proyectos de perforación y se señalan los periodos donde hay un aumento en el precio de todos los aceites (crudo WTI, Brent y aceite Diésel). Son 3 casos los que pueden servir como ejemplo donde es posible dar viabilidad a la implementación del aceite de higuera.

El volumen disponible de aceite base es un tema que debe incluirse en el proyecto, para identificar posibles proveedores o empresas con la capacidad suficiente de



abastecimiento en el menor tiempo posible, teniendo en cuenta que si se desea realizar una campaña de perforación importante la necesidad de fluido podría exceder los 10.000 bbls de fluido base. Una campaña de perforación importante traerá ganancias significativas para las empresas implicadas en dicha campaña, por esta razón se debe hacer una estimulación del posible negocio a través de resultados científicos combinados con análisis financieros para tener una mejor prospectiva del futuro en tema de fluidos de perforación.

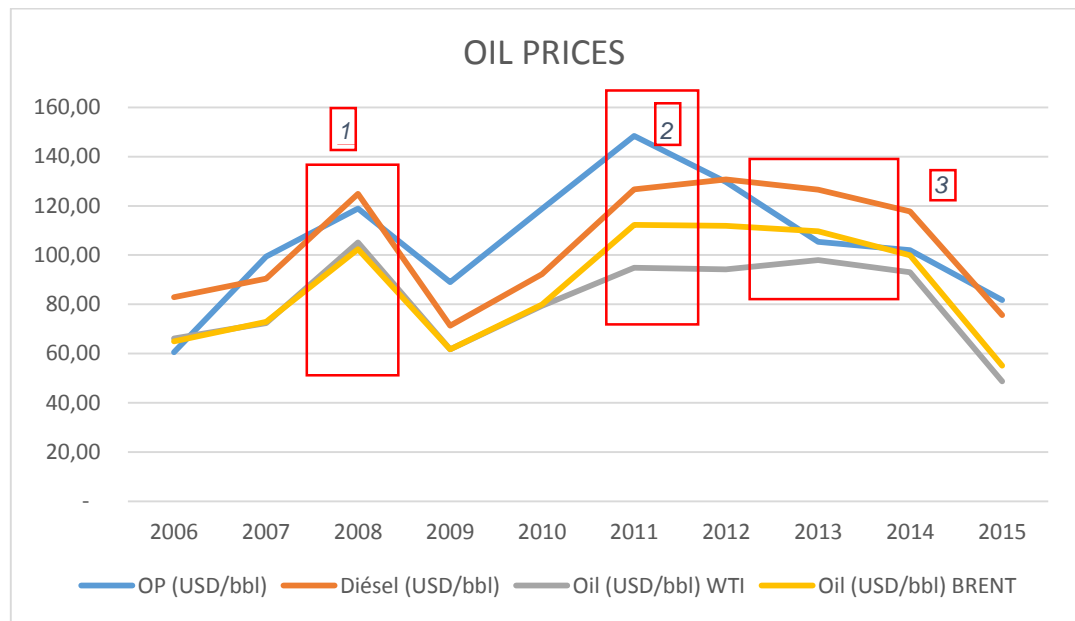


Ilustración 63. Comparación de precios aceites Palma, Diesel, WTI, Brent. Consultado Wallstreet Journal- y Centro de estudios de finanzas publicas México.

Caso 1 y 2:

Para pagar el precio de la perforación se basa en perfiles de producción generados por el área de yacimientos, si en el año donde se perfora el precio del crudo es elevado habrá un margen más amplio de realizar pruebas con fluidos más costosos con el fin de optimizar las perforación en aspectos como cuidar la integridad del pozo, evitar sidetracks, y cuidar las formaciones productoras.

Caso 3:



Corresponde a los años donde se incrementa la producción del volumen y al mismo tiempo hay declinación del precio del aceite base para fluidos de perforación pero se continúa con precios del crudo altos. Estas condiciones son favorables para la implementación de fluidos con altos precios y abrir oportunidades para probar su potencial en diferentes tipos de pozos.

En ocasiones es necesario el uso de un tipo de fluido de perforación independiente de su precio, donde las condiciones demandantes exigen un fluido de perforación base aceite. Adicionalmente las entidades ambientales exigen especificaciones de no afectación el medio ambiente, no obstante fluidos como el lodo base aceite de higuierilla podrían entrar a formar un papel fundamental en la industria del petróleo, por lo tanto el estudio de fluidos nuevos debe continuar, revisando aspectos para la implementación de estas nuevas alternativas en la perforación de pozos de petróleo en el mundo.

Se implementó un cálculo de producción de volúmenes por hectárea, basándose de que cada semilla de higuierilla produzca el mismo %wt de aceite. Es de aclarar que este porcentaje varía entre el 48% – 55%, sin embargo se utilizó el 50% para realizar el cálculo.

Tabla 28. Datos de abastecimiento de aceite de Higuierilla.

	Hectáreas	Barriles	Año
Básica	1	9,81	29,43
	100	980,87	2942,61
Mejora rendimiento en un 10%	1	10,79	32,37
	100	1078,96	3236,87
Mejora rendimiento en un 20%	1	11,77	35,31
	100	1177,04	3531,13
Mejora rendimiento en un 30%	1	12,75	38,25
	100	1275,13	3825,40
Mejora rendimiento en un 40%	1	13,73	41,20
	100	1373,22	4119,66
Mejora rendimiento en un 50%	1	14,71	44,14
	100	1471,31	4413,92



Esta información se basa en datos suministrados por empresas que extraen el aceite de higuera, se produce 1500 Kilos de aceite por hectárea y se puede cosechar 5 veces al año. Esta es la base de cálculo de la información de la Tabla 28.

Finalmente para la evaluación del precio del aceite y la sensibilidad del mismo se muestra una estrategia competitiva en el mercado basada en:

- Los volúmenes requeridos normalmente para la perforación de un pozo son alrededor de 1000 bbl, adicional 500 – 1000 bbl más en tanques.
- Un compromiso de las empresas proveedoras en reducir el precio del aceite por el volumen cotizado.
- La tecnificación en la extracción y procesamiento del aceite, para lograr precios más atractivos y disponibilidad suficiente de fluido.
- Posible aumento de demanda de aceite de higuera por diversas aplicaciones.

Usando una TRM de 3100 se ajustó los posibles precios variables según las sensibilidades correspondientes a los ítems anteriormente mencionados, para observar los posibles escenarios de aplicación al proyecto.

Tabla 29. Sensibilidades para el precio del aceite de Higuera

Aceite de Higuera	
Precio (USD/bbl)	Reducción
337,53	0%
285,60	15%
259,64	23%
220,69	35%
189,53	44%
129,82	62%
103,85	69%

Precio original tomado a 20/12/2015

Al elegir un precio del aceite para la evaluación económica por barril de lodo formulado, se debe ser muy cuidadoso y realista, con el fin de tener datos más confiables para un proyecto macro. Los lodos base aceite son reutilizables, y puede haber un ahorro de capital en el uso del mismo en un determinado número de pozos, en una campaña de perforación de gran escala, llevando siempre una buena estrategia de negocio.

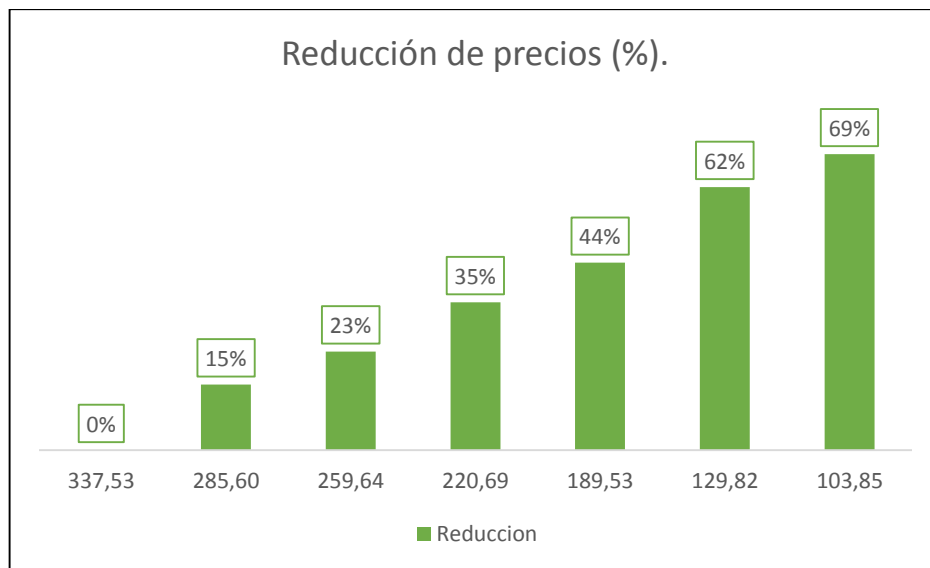


Ilustración 64. Esquema reducción de precios aceite de Higuera.

Se eligió una reducción máxima de 44% en el precio del aceite de higuera llegando a un precio de 189,53 USD/Bbl. El aceite DIESEL en años pasados (2011,2012, 2013)⁷ tuvo valores por encima de los 100 USD llegando hasta 148 USD/Bbl, y aun se realizaron perforaciones con fluidos base aceite por distintos retos técnicos que se han mencionado en este estudio, por lo tanto con la optimización del precio del aceite llega a ser factible y posiblemente rentable utilizar este aceite vegetal como fluido de perforación.

Ya teniendo el valor del aceite base y la formulación óptima se procede a calcular el valor del barril de lodo de perforación base aceite de higuera:



Tabla 30. Evaluación económica del OBM de Higerilla

Escenario Actual Aceite con reducción de 0%			
Evaluación Económica para OBM			
Componente (aditivo)	Concen. (Lb/bbl)	Costo (\$)/Lb	Costo del componente (\$) / bbl
Aceite Base	0,7714	337,53	260,37
Emulsificante	2	0,5	1,00
Humectante	1,5	0,043	0,06
Agua	0	0	-
Viscosificante	14	1	14,00
Gilsonita	10	0,4	4,00
Cal	0	0	-
Activador	7	1,2	8,40
CaCO3	120	0,048	5,76
Total (1 bbl)		\$ 293,59	

Según las sensibilidades realizadas anteriormente los costos en diferentes escenarios dependientes de una cantidad de situaciones son:

Tabla 31. Escenarios Precio/Bbl según sensibilidades en el aceite de Higerilla.

Evaluación Económica para OBM de Higerilla	
Escenario 23%	\$ 233,51
Escenario 35%	\$ 203,46
Escenario 44%	\$ 179,43
Escenario 62%	\$ 163,04
Escenario 69%	\$ 137,07

Para exponer de una manera más clara en que situaciones se puede aplicar el OBM de higerilla y de la misma forma evaluarlo económicamente, simulando la prestación del servicio de fluidos de perforación incluyendo todos los ítems (Ing. De fluidos, técnicos, fractank, etc), y asumiendo que el servicio de control de sólidos se cubre por otro contrato.



Para elaborar una comparación adecuada de los precios del aceite de palma y el diésel se investigó en varias fuentes económicas los historiales de precios y el valor actual de cada aceite (Wall Street Journal, INDEXMUNDI)

Tabla 32. Evaluación Precio/Bbl de OBM de palma y Diesel con Formulación final.

Evaluación Económica para OBM		
	\$/Bbl Aceite	\$/Bbl Lodo
Aceite de palma	\$ 104,00	\$ 141,22
Aceite DIESEL	\$ 90,63	\$ 127,85

Precio tomado 20/12/2015

Para materializar el entorno en el que está el proyecto se expondrá unos casos posibles de diseños de pozos donde sea factible utilizar un lodo de perforación base aceite de higuerilla, adicionalmente como se podría exponerlo y venderlo en el mercado como lo hacen grandes empresas prestadoras de servicios con los fluidos o sistemas que ellos fabrican y han patentado.

DIESEL	PALMA	HIGUERILLA
90,63 USD/bbl	104 USD/bbl	336 USD/bbl
<i>Fuente: web "Globalpetrolprices.com"</i>	<i>Fuente: Indupalma</i>	<i>Fuente: Colmerk S.A.</i>

Precio tomado 20/12/2015

El precio de Higuerilla es ligeramente variable dependiendo de la empresa que suministre el producto, por esta razón la evaluación se realizó con el precio brindado por COLMERK S.A., quienes fueron los proveedores del fluido base.

El proyecto al tener una aplicación mundial tiene diversidad de precios dependiendo de quién abastezca la necesidad, en la Republica de la India al igual que en Brasil, su producción es tan alta que los precios son mucho más bajos que en Colombia, un barril de ACEITE DE HIGUERILLA puede llegar a los 40 USD/Bbl, Según lo anterior estudios de comercio con países productores podría solucionar el alto costo del fluido e incluso ser más económico que el aceite diesel.



6.4.2. Casos evaluados

Caso 1:

Asumiendo que el pozo es vertical y el estado mecánico del pozo será el siguiente:

Adicionalmente para la evaluación económica se consideró pertinente tener en cuenta los siguientes factores para el valor de %adicionales que se usara para el ejercicio.

%Adicional incluye:

- Movilización y desmovilización de 8 Fractanks para (4000 bbl de fluido).
- Ingeniero de Fluidos.
- Técnicos necesarios.
- Caseta de laboratorio.
- Bomba eléctrica de trasiego.
- Geomembrana para protección del medio ambiente.
- Costos de dewatering.
- Perdidas de fluido por evaporación y humectación en los recortes.

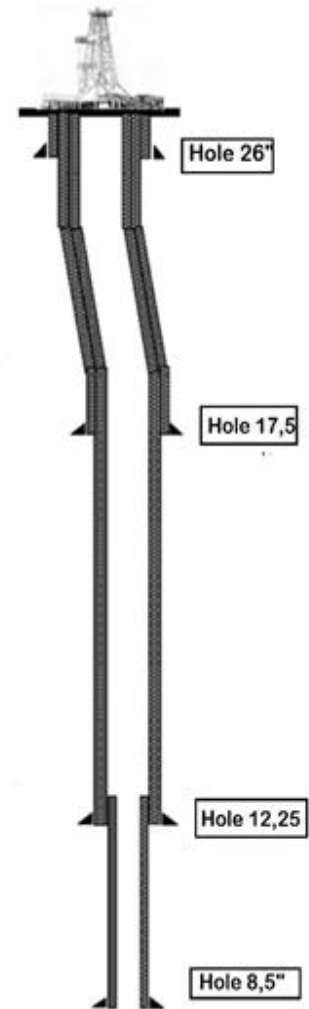


Ilustración 65. Estado Mecánico Pozo Caso 1.

Tabla 33. Estado Mecánico Pozo Caso 1.

Diam. (In)	Desde (Ft)	Hasta (Ft)	Capacidad (bbl/ft)
26	0	200	0,6567
17,5	200	1000	0,2975
12,25	1000	4000	0,1458
8,5	4000	10000	0,0702

Los cálculos de volúmenes necesarios son los siguientes:



Tabla 34. Volumen necesario para pozo caso 1.

Hole (In)	Volumen del hueco (bbl)	Exceso (%)	Vol. Hueco + Exceso (bbl)	Vol. Tanq. (BBL)
26	131	100	263	1000
17,5	238	100	476	1000
12,25	437	0	437	0
8,5	421	0	421	0

El ítem de volumen en exceso es únicamente por seguridad (perdida de fluido por evaporación y humectación) y abastecimiento en cualquier eventualidad inusual del pozo, de lo contrario si se necesita fluido y no hay a disposición; la operación debe parar hasta que llegue el fluido ocasionando pérdidas de dinero y problemas operacionales como pega de tubería, arremetidas posteriores, etc.

La evaluación del proyecto se efectuó de la siguiente manera:

Se manejó en todos los casos un margen de \$100.000 USD destinado a los factores mencionados anteriormente. Se manejan varios porcentajes de ganancia, según sea la disminución del precio crudo del aceite por estrategias de mercado entre las empresas.

Tabla 35. Propuesta de negocio de OBM de Higerilla para caso 1.

Costo/Bbl (USD/bbl lodo)	Costo Total	Ganancia	Costo a Cliente
\$ 292,59	\$ 1.056.082	\$ 528.041	\$ 1.684.123

Según las sensibilidades realizadas al precio del aceite de higerilla las valoraciones del proyecto son:



Tabla 36. Sensibilidades para la propuesta de negocio de OBM de Higerilla para caso 1.

Costo/Bbl (USD/bbl lodo)	Costo Total	Ganancia	Costo a Cliente
\$ 233,51	\$ 839.966	\$ 587.976	\$ 1.527.943
\$ 203,46	\$ 731.872	\$ 658.685	\$ 1.490.558
\$ 179,43	\$ 645.433	\$ 709.977	\$ 1.455.410
\$ 163,04	\$ 586.476	\$ 762.419	\$ 1.448.896
\$ 137,07	\$ 493.059	\$ 838.200	\$ 1.431.259

Precio tomado 20/12/2015

Los valores presentados en la tabla 37 son tomados de un pozo cotizado X, se muestra esta información para exponer el precio del fluido de perforación en todo el proyecto de perforación. Para una campaña de perforación estos valores fluctúan debido a muchos factores, para un estudio más específico se necesita información precisa de un pozo en cuanto a información geológica, técnica, de ubicación, estado de la locación, el tipo de equipo que se necesite (850, 1000,1500, 2000 HP), etc

Tabla 37. Costos de perforación de un Pozo con OBM de Higerilla.

Evaluación Económica - PERFORACIÓN	
CAPEX PERFORACIÓN	POZO
Equipo de perforación	\$ 2.159.998
Movilización	\$ 307.604
Fluido de Perforación	\$ 1.684.123
Control de sólidos	\$ 741.969,00
Control direccional	\$ 239.392
Revestimiento	\$ 1.034.198
Cementación	\$ 329.362
Completamiento	\$ 798.332
Otros servicios	\$ 2.517.041
Total	\$ 9.812.019

Valores tomados 05/10/2015

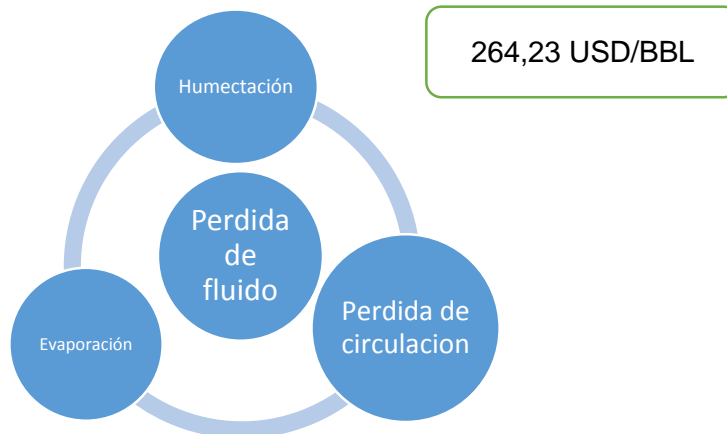
En caso de ser posible la reutilización del fluido (es una de las ventajas de los fluidos base aceite), y de que se realice una campaña de perforación, la operadora ahorrara el valor de formulación del fluido, por lo tanto en una campaña de tres pozos el

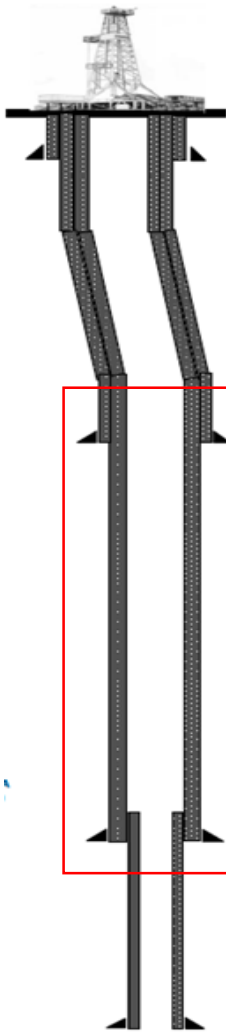


ahorro podrá evidenciarse desde el segundo pozo. Sin embargo para la reutilización del lodo este debe pasar por un control de remoción de sólidos, y en este estudio no se profundizara el tema a fondo, por lo tanto solo mencionaremos la ventaja de la reutilización del lodo base aceite sin agregarlo en la evaluación económica.

Para el caso 1 y el caso 2 que se mostrara posteriormente, se debe aplicar una **MULTA POR CADA BARRIL DE LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA PERDIDO EN LA OPERACIÓN POR CAUSAS OPERACIONALES**, perder fluido puede causar pérdidas económicas debido a que es un fluido reutilizable (OBM). El fluido usado puede ser combinado con fluido nuevo y de esta manera lograr un ahorro en la formulación de lodo para la perforación de más pozos. En este estudio se pensó que un valor de 90% del valor de cada barril seria cobrado en el caso de pérdida de fluido hacia la formación.

Solo se cobrara el volumen perdido por perdida de circulación, los eventos de evaporación y humectación son considerados en los % de exceso en los tanques. El costo para el OBM de Higuierilla seria de:



**Caso 2:**

Este caso está direccionado a cierto intervalo seleccionado anteriormente por la persona de perforación basándose en experiencias en otros pozos de la zona y con el conocimiento de los posibles problemas debido a las formaciones presentes en dicha sección.

Es común que al perforar se utilicen varios sistemas de fluido, dependiendo de la sección y las formaciones que se van a atravesar, como formaciones arcillosas, alta intercalación de litología y muy importante en zonas de altas y bajas presiones.

Ha sido positiva la respuesta a los lodos base aceite en una de las formaciones más problemáticas en el Huila, que es la formación Villeta en la cuenca VSM (Valle superior del Magdalena) y por otra parte en la formación CARBONERA, especialmente las “CARBONERAS IMPARES” (C1, C3, C5, C7), de la cuenca LLA (LLANOS).

*Ilustración 66.
Estado Mecánico
Pozo Caso 2.*

En la geología es normal encontrar las formaciones en diferentes profundidades, por esto es muy importante la correcta planeación de perforación, y el fluido correcto puede facilitar la rápida y eficaz perforación y completamiento del pozo.

Tengamos en cuenta que tanto la formación Villeta como la formación carbonera poseen shales, y lodolitas, rocas que suelen presentar problemas en la perforación.



En este caso se utilizara un estado mecánico donde la formación problema está situada en la sección 12 ¼”, por lo tanto el balance volumétrico se realizó con esa información.

Tabla 38. Especificaciones sección 12 1/4 “- Caso 2 de perforación

Sección 12 ¼				
HUECO	CSG	Desde (ft)	Hasta (ft)	Capacidad Hole (Bbl/ft)
12,25”	9,625”	7971	11702	0,1458
Sección 12 ¼				
Volum. Hole (Bbl)		Volumen Tks (Bbl)		Volumen Total. (Bbl)
544		1000		1544

Se maneja un margen de 1.8 de volumen adicional en tanques por cuestiones de seguridad y eventualidades operacionales (perdida de fluido, mezcla de píldoras viscosas, cambio del plan de perforación, entre otros).

Tabla 39. . Costos por barril - propuesta de negocio de OBM de Higerilla para caso 2.

Sección 12 1/4			
Costo/Bbl (USD/bbl lodo)	Costo Total	Valor	Costo a Cliente
\$ 293,59	\$ 451.728	\$ 225.864	\$ 779.907
\$ 233,51	\$ 360.514	\$ 252.360	\$ 712.874
\$ 203,46	\$ 314.120	\$ 282.708	\$ 696.829
\$ 179,43	\$ 277.021	\$ 304.723	\$ 681.743
\$ 163,04	\$ 251.716	\$ 327.231	\$ 678.947
\$ 137,07	\$ 211.621	\$ 359.756	\$ 671.378

Precio tomado 20/12/2015

Debido a que en el caso 2 solo se perforaría con lodo base aceite la sección de 12 ¼”, las secciones 26”, 17 ½” y 8 ½” muy seguramente se perforaran con un fluido base agua porque este tipo de fluido presenta mayores ventajas realizando un



balance general costo-beneficio, dicho de otra forma el lodo base aceite (alto costo) se debe utilizar donde las condiciones los requieran.

No se realizara el balance total de la perforación debido a que es necesario tener información sobre el fluido o los fluidos de las secciones diferentes a 12 ¼". Lo más recomendable es que la misma empresa preste el servicio de fluido base agua, base aceite y base sintéticos (algunos), sin embargo si los requerimientos necesitan una segunda o tercera empresa los costos totales empezaran a cambiar.

En cuanto a la disposición del lodo después de la perforación, cuando este ya no pueda ser usado en operaciones de perforación, debe realizarse a el un tratamiento para su posterior desecho, al igual que a los recortes de perforación, a este ítem le llamaremos el VALOR POR LANDFARM, este normalmente esta entre 10 – 40 USD/BBL, sin embargo debido a que el aceite de higuera es de origen vegetal, es muy probable que el costo de landfarm sea menor, sin embargo se necesita realizar pruebas evaluando costos de tratamiento.

6.4.3. Análisis económico.

- Es fundamental realizar sensibilidades para mostrar las posibilidades de aplicación del aceite de higuera, aunque el precio del barril de aceite de Castor en Colombia es elevado, es posible realizar convenios tecnológicos con las empresas fomentando la producción de aceite.
- El caso 2 es una aplicación más común en la perforación, ya que muchas formaciones superficiales y/o que no tienen arcillas no necesitan un fluido costoso como un fluido base aceite, y las especificaciones son mínimas, por lo tanto es más factible usar lodos base agua para este tipo de formaciones, siempre pensando en la economía del proyecto.



- Aunque el valor económico del OBM de higuierilla es alto, los problemas operacionales y ambientales de no usar un lodo base aceite ambientalmente amigable puede llegar a tener un costo más alto, por ejemplo:
 - Debido a cuestiones operacionales y al no uso de un fluido base aceite pueden ocurrir los siguientes eventos: sidetrack, pega de tubería con herramientas direccionales, herramientas LWD, MWD en fondo, etc. En todas estas opciones el costo total será mayor que si se utiliza un fluido un poco más costoso pero que dará más seguridad en la operación.
 - Debido al daño ambiental generado por el mal manejo de los fluidos, un LANDFARM más costoso de los desechos de perforación y las multas ambientales puede resultar en valores cercanos hasta el 70% del costo de la misma perforación.
- El fluido de perforación más costoso es el de Higuierilla, el OBM Diesel sería más económico de lo presentado en este proyecto, porque este necesitaría menos aditivo para lograr buena reología, sin embargo el impacto ambiental que este tiene lo podría volver inaplicable en campos donde ya se ha descartado el uso de este aceite derivado del petróleo. Por otra parte el aceite de palma tiene un bajo costo por el mercado Colombiano debido a que este cultivo ha estado incursionando en sobreoferta en los últimos años en el país.
- Según fuentes de abastecimiento de aceite de ricino en India y Brasil el barril de aceite de higuierilla puede llegar hasta los 50USD/Bbbl, ya que son países con mercados fortalecidos.



6.5. COMPARACION ENTRE EL ACEITE DE HIGUERILLA, PALMA Y DIESEL

Para realizar la comparación se tuvo en cuenta aspectos ambientales, reológicos, económicos, siembra y sostenimiento, de densidad y estabilidad eléctrica

COMPARACIÓN ECONÓMICA:

Precios de los aceites en USD/barril para el año 2015:

DIESEL	PALMA	HIGUERILLA
90,63 USD/bbl <i>Fuente: web “Globalpetrolprices.com”</i>	104 USD/bbl <i>Fuente: Indupalma</i>	336 USD/bbl <i>Fuente: Colmerk S.A.</i>

Precio tomado 20/12/2015

En Colombia, el precio del aceite de higuierilla es mucho más costoso que el diésel y la palma. Sin embargo, este precio puede estar sujeto a muchas sensibilidades como se planteó anteriormente en las consideraciones económicas. Dichas sensibilidades dependen de las políticas de negocio en las que incluye: rebaja de precio a mayoristas, nuevos proyectos precursores de nivel nacional, etc. India, Brasil y China constituyen el 93 % de la producción de aceite de higuierilla en el mundo (*Condorchem enviterch blog*), es decir el 7 % restante lo constituye el resto del planeta es por esta razón que en india el precio oscila en 50 USD/bbl (*Castor oil blog*). Los precios dependen de la oferta y la demanda por lo tanto si se requiere una cantidad determinada de aceite para incluirlo en operaciones petroleras, es posible que la industria aceitera en Colombia incremente sus proyectos de producción y generen una oferta más alta que conlleve a bajar los precios.

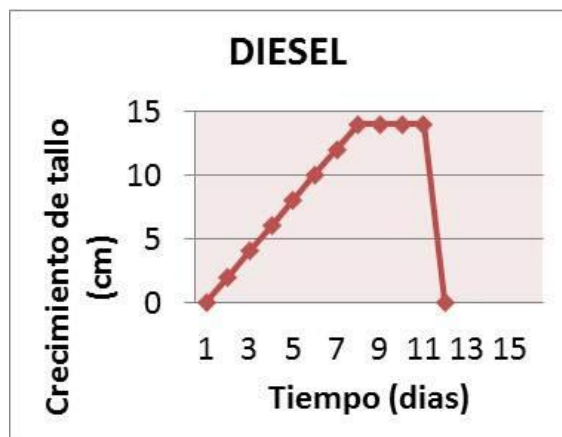
Se mostrara el costo de la formulación del fluido y no como un negocio (sin incluir % adicionales y ganancia):

Tabla 40. Comparación económica de OBM Higuierilla, Palma y Diesel

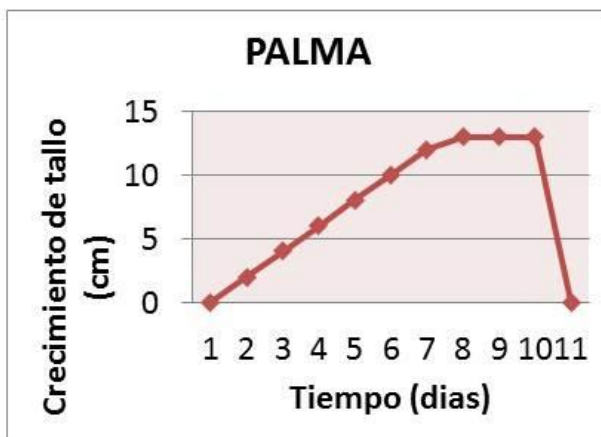
Precios evaluación de los aceites			
	Higuierilla	Palma	Diesel
Costo / Bbl Mud	\$ 293,59	\$ 141,22	\$ 127,85
Caso 1	\$ 1.056.082	\$ 861.980	\$ 789.840
Caso 2	\$ 779.907	\$ 427.043	\$ 396.080

6.5.1. Comparación ambiental

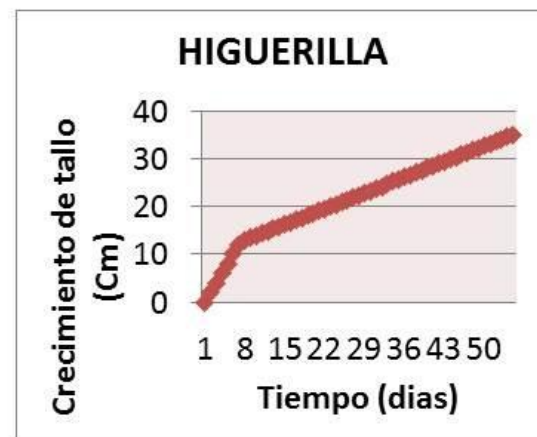
ACEITE DIESEL



ACEITE DE PALMA



ACEITE DE HIGUERILLA



OBSERVACIONES: El mismo día de su contaminación, la planta paró su crecimiento. Alrededor de seis horas después, sus hojas ya presentaban marchitamiento, el color del tallo evidenciaban la afectación ambiental.

OBSERVACIONES: El cambio en la coloratura de tallo y hojas fue bastante rápido. El lodo de palma era la muestra que tenía menor viscosidad por lo tanto penetra más ligero el interior de la materia.

OBSERVACIONES: A pesar de que la planta redujo su tasa de crecimiento y hubo cambios en su coloratura, la planta tuvo un nivel de supervivencia de más de 25 días.

- De acuerdo a los días de supervivencia y la rata de crecimiento de las 3 plantas de frijol que fueron contaminadas con 100 ml de su aceite respectivo, se puede analizar que de los 3 aceites el que tuvo más días de supervivencia fue el de higuerrilla. Seguido por el de diésel y luego el de palma. Teóricamente se pensaría que es más contaminante el aceite diésel que el de palma, pero como se muestra en las fotos, la palma por su baja viscosidad tiende a impregnar con mayor facilidad el fondo de la matera, es por esta razón que la planta murió más rápido. Esto puede ser un punto a favor para el aceite de higuerrilla en el caso de un derrame por el daño de una línea. Al ser demasiado viscoso su contaminación podría ser muy superficial y más fácil de corregir.
- En el capítulo 6 de evaluación ambiental se mostró evidencias fotográficas de la evolución de las plantas de frijol en la contaminación con palma, diésel e higuerrilla llegando al siguiente gráfico:

Tabla 41. Prueba Toxicológica - Plantas de frijol

FLUIDO	HIGUERILLA	PALMA	DIESEL
Días de supervivencia	21	3	3

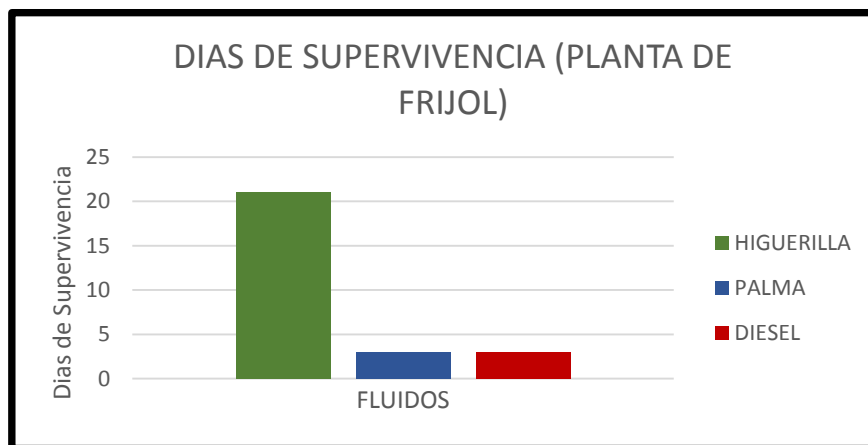


Ilustración 67. Prueba Toxicológica- Planta de frijol.

- Como se mostró en la prueba de toxicidad, el fluido a base de higuerrilla no generó efectos negativos dentro de la planta lo que indica que es un lodo



ecológico sin ninguna emisión nociva, mientras que los fluidos de palma y diésel presentaron un efecto más contaminante. Como ya se sabe, el aceite diésel contiene en su estructura química compuestos aromáticos que generan en la salud humana un efecto toxicológico cancerígeno con múltiples repercusiones a corto y a largo plazo y al momento de disposición de residuos provenientes de los fluidos de perforación, presenta un efecto nocivo en el medio ambiente.

- Durante los últimos años, el cultivo de palma ha sido motivo de polémicas por parte de los ambientalistas. Ellos plantean que este tipo de siembras requiere de grandes extensiones de tierra, por lo tanto es necesario talar árboles, desplazar especies nativas y realizar quemas indiscriminadas, lo que provoca una alta emisión de CO₂ y reducción de oxígeno en el planeta. Por otro lado, el monocultivo industrial de este árbol requiere grandes cantidades de productos químicos como fertilizantes y pesticidas que contaminan ríos, causan sequías excesivas, envenenamiento de suelos, etc.
- En este macroproyecto, los estudiantes Luis Carlos García y Juan Sebastián Álvarez Yaguara realizaron un trabajo de grado en el que se evaluaba la disminución de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos impregnados con residuos de fluidos de perforación base aceite de higuera. El objetivo principal radicaba en impregnar suelos con residuos de diésel y ricino para luego aplicar biorremediación a partir de humus líquido derivada de la transformación de la materia orgánica compostada por medio de la lombriz roja californiana. La meta era encontrar cuál de los suelos se remediaba de manera más rápida y además medir ecotoxicidad de plantas a través de variables físicas de las mismas.
- Se llegó a la conclusión que el porcentaje de disminución de TPH en un suelo impregnado con diésel fue de 12,65% mientras que el de higuera fue 38,96%.



Es decir el aceite de ricino es 3 veces más versátil a una remediación aplicada con humus líquido.

6.5.2. Comparación reológica

Se formuló un lodo de palma y diésel con la misma cantidad de aditivo que requirió el aceite de higuera para dar buenos resultados.

Tabla 42. Formulación General (Optima).

Formulación General	
Componente	Concen. (lb/bbl)
Aceite Higuera	0.8
Arcilla Organ.	14
Humectante	1
FYS I	7
Gilsonita	10
Emulsificante	2
CaCO ₃	120



Ilustración 68. OBM de Palma con formulación General.



Tabla 43. Formulación y Reología Lodo de Palma

LODO DE PALMA					
T=65°C		T=80°C		T=120°C	
RPM	Lb/100ft2	RPM	Lb/100ft2	RPM	Lb/100ft2
600	54	600	45	600	40
300	39	300	33	300	30
200	32	200	28	200	23
100	29	100	23	100	17
60	25	60	20	60	15
30	21	30	17	30	13
6	16	6	14	6	10
3	15	3	12	3	9
VP	15	VP	12	VP	10
YP	24	YP	21	YP	20
Gel 10 s	10	Gel 10 s	7	Gel 10 s	5
Gel 10 min	10	Gel10 min	7	Gel 10 min	5

Tabla 44. Formulación y Reología Aceite de Higuierilla (Sin rolar).

LODO DE HIGUERILLA					
T=72°C		T=80°C		T=120°C	
RPM	Lb/100ft2	RPM	Lb/100ft2	RPM	Lb/100ft2
600	260	600	235	600	210
300	155	300	132	300	115
200	118	200	95	200	89
100	77	100	55	100	42
60	62	60	39	60	32
30	44	30	25	30	18
6	15	6	12	6	10
3	13	3	10	3	8
VP	105	VP	103	VP	95
YP	50	YP	29	YP	20
Gel 10 s	13	Gel 10 s	10	Gel 10 s	8
Gel 10 min	13	Gel10 min	10	Gel 10 min	8

NOTA: El lodo base aceite diésel con la cantidad de aditivos mencionada anteriormente tuvo una gelificación tan alta desde el principio que fue imposible hallarle su reología. Este aspecto indica claramente que necesita menos aditivos para llegar a una reología adecuada, lo que resulta económico para la empresa.



Ilustración 69. Fluido formulado con aceite Diesel.

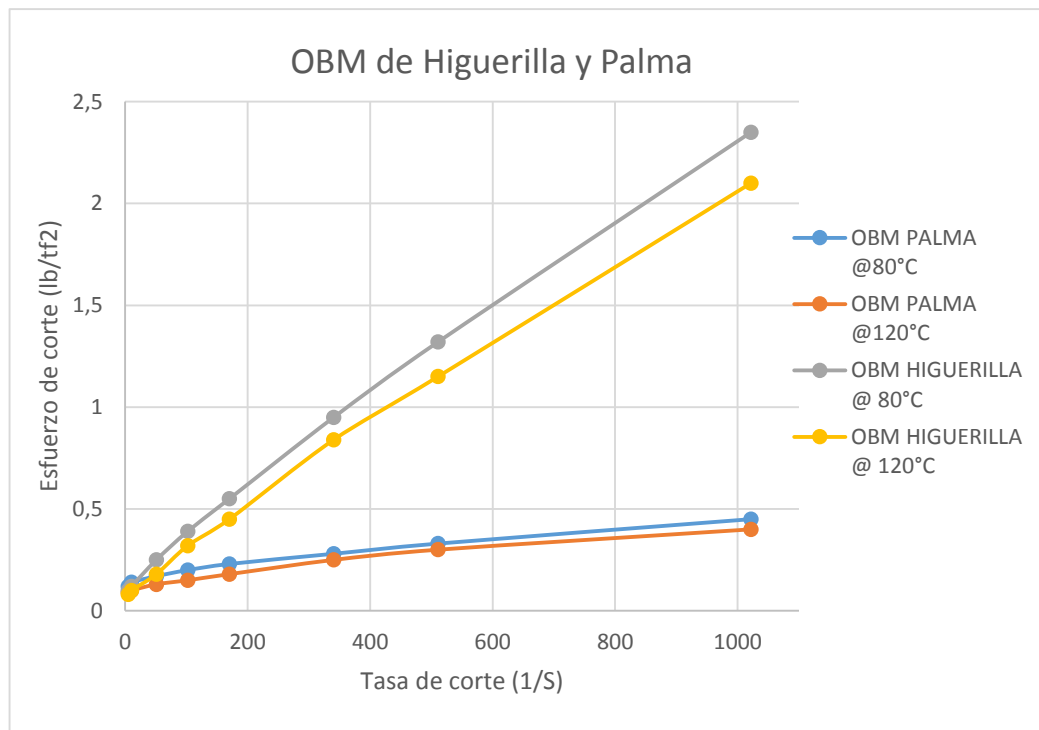


Ilustración 70. Reograma OBM Higuierilla y Plama

La viscosidad (pendiente de la gráfica) como se observa en la ilustración 70 es una propiedad que diferencia notablemente ambos fluidos formulados, los fluidos mostraron comportamientos estables a las altas temperaturas, sin embargo la apariencia y cantidad de fluido de la muestra de palma cambiaron notoriamente, fue necesario realizar más fluido de palma debido a la evaporación por la alta temperatura, y al dejar en reposo el fluido este difícilmente volvía a su estado fluido.

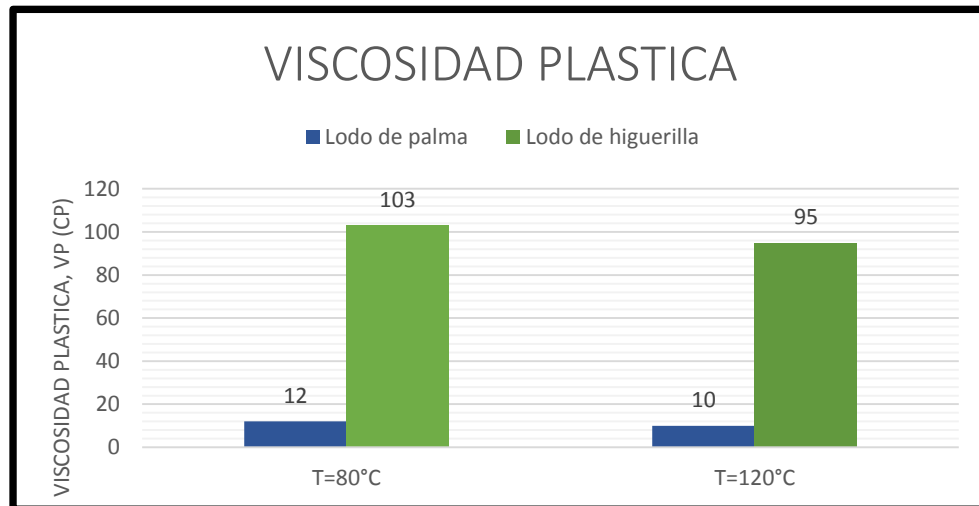


Ilustración 71. Comparación Viscosidades plásticas OBM de Higuierilla y Palma.

El OMB de higuierilla presenta una especial característica la cual es la conservación la de “yield strength” con el aumento de la temperatura en un rango de 72°C a 120°C, el YS se mantuvo en un valor de 7 lb/100ft², un valor aceptable en la perforación.

Tabla 45. YS OBM de Palma e Higuierilla

YS = 2*(θ3) - θ6	OBM Vegetal
OBM HIGUERILLA 70°C	7
OBM HIGUERILLA 80°C	7
OBM HIGUERILLA 120°C	7
OBM PALMA 65°C	14
OBM PALMA 80°C	10
OBM PALMA 120°C	8



Las viscosidades plásticas entre los dos aceites vegetales presentan una marcada diferencia. El aceite de higuera es el más viscoso de todos los aceites vegetales por lo tanto va a tener una tendencia a resistir su flujo cuando se inicie el proceso de circulación. Teóricamente el lodo a base de palma es mucho menos problemático en este sentido, sin embargo, se debe resaltar siempre que por su alta viscosidad el aceite de ricino es resistente a temperaturas muy elevadas. Además de ello, con el avance de la ciencia se prevé que este tipo de inconvenientes puedan tener dos soluciones que resulten económicas y beneficiosas. Por ejemplo, la primera de ellas es desarrollar algún tipo de adelgazante o reductor de viscosidad para el sistema de lodo completo y la segunda, reducirle la viscosidad al aceite mediante procesos químicos como lo son: transesterificación, pirolisis, craqueo térmico, metátesis, entre otros.

Para comprobar lo dicho, se seleccionó uno de los métodos anteriores con el fin de realizar una prueba ensayo en la que se determinaba la curva de viscosidad plástica del aceite de higuera antes y después de mezclarlo con metanol en una relación 90/10 teniendo en cuenta que por su estructura química hace del aceite un fluido soluble en alcohol. A la mezcla de aceite, metanol y una cantidad mínima de hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador es lo que se conoce como transesterificación.

A continuación se presentan las dos curvas respectivas:

Tabla 46. Reducción de viscosidad del aceite de higuera con metanol.

T (°C)	VP (Cp)		
	HIG.	HIG.+METANOL (90/10)	Reducción
65	69	34	51%
70	58	27	53%
75	44	24	45%
80	38	22	42%
85	31	19	39%
90	26	17	35%
95	22	16	27%



100	19	15	21%
105	17	14	18%
110	16	13	19%
115	13	12	8%
120	12	11	8%
125	11	10	9%
130	10	9	10%

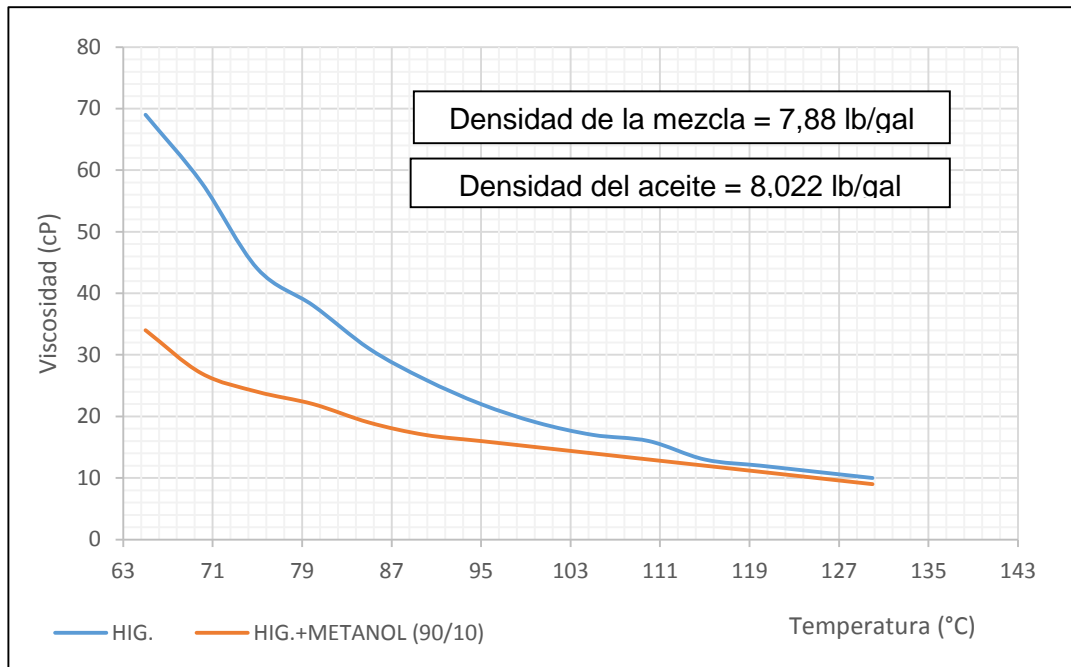


Ilustración 72. Perfiles de viscosidad Aceite de Higuera-Reducción de viscosidad con metanol.

Como se observa en la ilustración 72, a 65°C que es la temperatura a la cual se debe probar un lodo base aceite según la norma API 13 B2. Se observa una reducción en viscosidad del 51% lo que significa que el metanol disminuye la viscosidad de manera efectiva en el sistema. Este procedimiento se realizó con el fin de mostrar de manera superficial la versatilidad del aceite al ser “alterado” para mejorar sus propiedades.

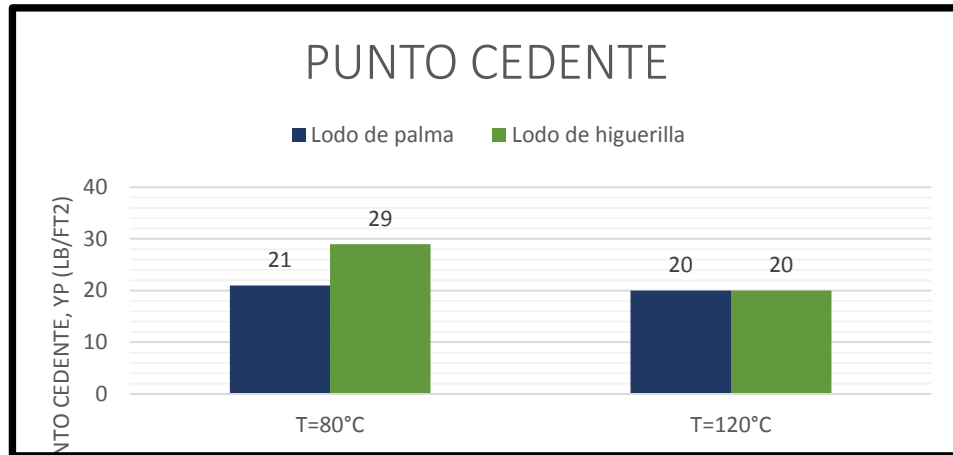


Ilustración 73. Comparación YP OBM de Higuierilla y Palma..

El punto cedente de los dos aceites es muy bueno y cumple los rangos establecidos, son mayores de 15 lb/100 ft2 (Leon Dong Guo, 2013) por lo tanto presenta una buena capacidad de acarreo, al igual que los geles son muy buenos para mantener sólidos en suspensión.

6.5.3. Comparación de densidad

Con la formulación dada en este capítulo los resultados de densidad son los siguientes:

Tabla 47. Comparación de Densidades Aceites usados en el estudio.

LODO	DENSIDAD (ppg)
Higuierilla	10,1
Palma	9,1
Diésel	9,6

En la tabla anterior se afirma que el lodo de higuierilla fue el que tuvo mayor densidad debido a su alta gravedad específica que difiere del resto de aceites vegetales, lo que significa que un lodo necesita menos densificante para llegar al peso requerido. Esto resulta beneficioso principalmente en aspectos económicos y de control de sólidos, además de que con los valores mostrados el fluido a base de ricino puede



trabajar en zonas de alta presión y es más eficiente al momento de controlar el empuje hidrostático.

6.5.4. Comparación de estabilidad eléctrica

La estabilidad eléctrica de los tres aceites es 1999 voltios lo que indica que está dentro del rango establecido. Es un valor muy bueno, ya que siendo excelente esta propiedad, la emulsión que se forma es bastante estable cuando se estima la presencia de agua.



Ilustración 74. Test de Estabilidad Eléctrica. Al OBM de Higuera.

6.5.5. Comparación en siembra y sostenimiento

HIGUERILLA	PALMA
<p>✓ El ricino no es una planta de difícil cultivo, crece rápidamente y puede ser criada como planta anual para sacar de ella la semilla o como planta perenne volviéndose en este caso de notables dimensiones, es una planta adaptable a muchos tipos</p>	<p>✓ Las características físicas y químicas del suelo influyen en el desarrollo de la palma de aceite, la palma de aceite es favorecida por suelos profundos, sueltos y con buen drenaje. Los suelos alcalinos le son perjudiciales. Requiere de</p>



<p>de terreno y logra también vegetar sin excesivos problemas en terrenos salinos.</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Su cosecha se da cinco veces al año.✓ El ricino no se poda. Se eliminan sencillamente las hojas que poco a poco se secan para evitar que se conviertan en vehículos de enfermedades parasitarias.✓ La planta crece a temperaturas aproximadas de 18°C y 32°C.✓ En cuanto a plagas, el ricino no tiene muchos enemigos que son únicamente las malas técnicas de cultivo, o si cultivados al exterior, las malas condiciones de meteorología (granizo, heleadas, etc.) las patologías parasitarias pueden ser provocadas por una humedad excesiva.	<p>suelos bien drenados que eviten que se lave el terreno y produzca lixiviación de nutrientes.</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Empieza a dar sus primeros frutos a los cinco años y sus cosechas son semestrales.✓ Es conveniente realizar una poda al año para eliminar inflorescencias masculinas deterioradas, racimos podridos, etc.✓ La planta crece a temperaturas aproximadas de 26°C y 28°C.✓ Las principales plagas son: ácaros, hormiga arriera, estrategus, ratas, escarabajo amarillo, minadores de las hojas, cucarrón negro, chinche de encaje.
--	---



7. CONCLUSIONES

- La afectación ambiental probada mediante el seguimiento de supervivencia de una planta de frijol muestra que el aceite de higuera no genera algún tipo de daño ecológico de gravedad alta.
- El aceite de Higuera puede ser empleado satisfactoriamente como fluido base en lodos de perforación de acuerdo a los valores reológicos, de densidad, estabilidad eléctrica y filtrado HT-HP hallados en este trabajo experimental.
- El lodo presenta geles planos, propiedad a favor que impide un incremento exagerado de reología al momento de algún tipo de contaminación por sólidos o por agua.
- Con el aumento de temperatura, disminuye la reología. Pero aun así el lodo presenta valores aceptable de reología. Geles y YP por encima de 7 y 15 lb/100ft² respectivamente.
- Se propuso una nueva aplicación para el aceite de higuera en Colombia: la preparación de un lodo de perforación 100% base aceite.
- El lodo de higuera cumple con las especificaciones técnicas requeridas al igual que el lodo de palma y diésel. De acuerdo a los rangos planteados presenta buenos valores reológicos que proporcionan además de otros beneficios una excelente limpieza al pozo. La viscosidad que caracteriza al aceite de ricino se puede disminuir empleado métodos químicos efectivos como lo es la transesterificación en donde se aprovecha la solubilidad de metanol en el aceite para hacer mejorar dicha propiedad.



- En Colombia el aceite de higuera presenta un costo más alto que los otros dos aceites estudiados. Esto se debe al proceso industrializado que tienen tanto el aceite de palma como el Diésel. Colombia es por excelencia un país que ha incursionado en el cultivo de palma, por lo tanto su oferta es contundente. No obstante, el cultivo de ricino por su versatilidad climatológica en Colombia puede posicionarse con seguridad como uno de los cultivos con mayor extensión por su nivel aplicativo.
- El lodo base de higuera al igual que otros aceites estudiados presentan un aumento significativo de reología al contaminarlo con sólidos (bentonita y carbonato) al igual que pasa con la presencia de agua como contaminante. Contrario a su comportamiento con la adición de cemento donde hay una disminución del punto cedente y sus geles, lo que produce una precipitación excesiva de sólidos.
- Entre todos los aditivos que se usaron los mejores resultados se obtuvieron usando la arcilla organofílica y el activador polar del mismo fabricante.



8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar una balanza presurizada para la medición de densidad debido al aire que entra en el fluido al mezclarse.
- Para la evaluación del posible daño a la formación que produzca el fluido base aceite de higuera se recomienda realizar pruebas de compatibilidad con agua y crudo de formación.
- Según la experiencia en este proyecto se recomienda utilizar los productos de una misma empresa para la formulación
- El control de sólidos juega un papel importante en el mantenimiento de los fluidos base aceite, como se observó en la tabla 27, los sólidos afectan bastante las propiedades reológicas y es fundamental realizar estudios sobre los tratamientos que se deben hacer al OBM de higuera y el costo de dichos tratamientos.
- Se recomienda realizar la prueba de filtrado dinámico para conocer como puede ser la acción erosiva sobre el cake en flujos laminares y turbulentos, además de las posibles afectaciones a las características del cake.
- Se recomienda realizar la prueba toxicológica en animales, específicamente en camarones citados en este trabajo de grado y encontrar el LC50 para estudiar la posibilidad de aplicación del fluido en pozos costa afuera (Offshore).
- Iniciar estudios de investigación a posibles componentes químicos que puedan servir de manera más eficiente como aditivos para los fluidos base aceite de higuera.



- Se recomienda la formulación de un lodo con CAL en su formulación, para su estudio como secuestrante de gases (CO_2 , H_2S), emulsificante y otras afectaciones que pueda tener en el los lodos base aceite vegetal.
- El alto costo del aceite puede ser modificado mediante la tecnificación e industrialización de la producción de aceite de higuera, aprovechando la variedad climática en Colombia puede llegar a hacer un producto competitivo en el mercado nacional e internacional.
- Estudiar el comportamiento de un lodo donde la fase continua sea el aceite de higuera y la fase dispersa pueda ser agua (emulsión inversa) o algún otro componente (metanol, diésel, etc).
- Hacer estudios de lubricidad al aceite de higuera (“Lubricity tester”) y probarlo como lubricante en lodos base agua.
- Evaluar el costo ambiental para el LANDFARMING del aceite de higuera, debido al alto potencial ambiental de este fluido de perforación.
- Para determinar la resistencia del fluido base aceite de higuera se debe realizar la prueba del BREAK POINT, en este estudio se recomienda utilizar el equipo FANN 50 (Rheometer Model 50SL High Temperature) para determinar este valor, el dato obtenido es supremamente importante para la aplicación del aceite a pozos con alta exigencia técnica ($T > 500^\circ\text{F}$ y $P > 1,000 \text{ PSI}$).
- Realizar un lodo con metanol como fase dispersa con el fin de formular un lodo con menor viscosidad y continúe siendo ambientalmente amigable.



9. BIBLIOGRAFÍA

1. CHEVRON, TEXACO, BP. (2000). Drilling fluids manual. In *Drilling fluids manual* (pp. 387 – 411). USA.
2. Okorie E. Agwu, I. A. (2015). Cost benefit analysis of vegetable oils used as alternatives to Diesel in Formulation of oil base muds , SPE-178265-MS. *SPE*.
3. MI.SWACO. (2005). *DRILLING FLUIDS MANUAL*. OXFORD: SLB.
4. Vera G., A. R. (2011). *NUEVA TECNOLOGÍA APLICADA A ZONAS DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN EN EL CAMPO BORBURATA-BARINAS*. Caracas, Venezuela.
5. J. Blanco, D. O. (2007). Society of Petroleum Engineers, Viscoelastic System as an Alternative to UBD for Drilling a Severely Fractured Limestone Reservoir. *SPE*.
6. Diaz, G. D. (2011). *EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL AMBIENTE SEDIMENTARIO EN LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN DE LOS POZOS PERFORADOS EN EL CAMPO SANTA ROSA DISTRITO GAS ANACO*. Puerto la cruz, Venezuela.
7. Dow Jones & Company, I. (2015, Noviembre 25). *Wall street Journal*. Retrieved from <http://www.wsj.com/>
8. Benta A. Tatiana, I. I. (2008). *Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsion inversa*. Bucaramanga: UIS.
9. ESVENCA. (2011). *Manual Control de sólidos*. Venezuela.
10. Martinez, M. A. (2009). *Tecnicas desarrolladas de los sistemas de control de sólidos de los fluidos de Perforación*. Lima, Peru.
11. Ryen Caenn, H. D. (2008). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Sixth Edition.
12. Adesina Fadairo, O. F. (2012). *Novel Formulation of Environmentally Friendly Oil Based Drilling Mud*. Nigeria: Department of Petroleum Engineering, University of Ibadan, Nigeria.
13. Anawe Paul A., E. V. (2014). *Investigating Alternatives To Diesel In Oil Based Drilling Mud*. Canaan Land, Ota: Journal of Environment and Earth Science.



14. Auta, M. (2013). Extraction and Characterization of Drilling Fluid from Castor Oil. *International Journal of Innovation and Applied Studies-ISSN 2028-9324 Vol. 3 No. 2, 382-387.*
15. Díaz Narváez, L. S. (2009). *EVALUACIÓN DE LOS ACEITES MINERALES VASSA LP-120-0A Y VASSA LP-120-0AE, PARA LA PREPARACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN 100% ACEITE DISEÑADOS PARA LAS PERFORACIONES COSTA AFUERA EN EL CAMPO DRAGÓN-NORTE DE PARIA*. Puerto La Cruz, Venezuela: UNIVERSIDAD DE ORIENTE.
16. Dr. qbu, q. M. (1991). *Formulation of an Environmentally Safe*. Malaysia: Petroleum Department, University Technology of Malaysia.
17. Fabio Ernesto Benavides Ayala, J. Q. (2011). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BIODIESEL COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA. *El Reventón Energético - Vol. 9 N° 1, 57-64.*
18. Fadairo Adesina, A. A. (2012). *Enviromental Impact Evaluation of a Safe Drilling Fluid* . Ota, Nigeria: Department of Petroleum Engineering, Covenant University,.
19. Fadairo Adesina, O. D. (2013). *Investigating The Carrying Capacity And The Effect Of Drilling Cutting On Rheological Properties Of Jatropa Oil Based Mud*. Ota, Nigeria: University of Ibadan, Covenant University Ota.
20. Institute, A. P. (2000). *API RP-13B, Standard Procedure for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids*.
21. INTEQ, B. H. (1998). *Manual de Ingeniería, Fluidos*. Houston,USA: Technical Communications Group.
22. M. Fefer, P.-C. L. (2001). *Environmentally Friendlier Drilling Mud Base Fluids*. Calagary.
23. Maxim Kabanov, E. T. (2014). *Designing and Running a Special Oil-Based Mud for a North Sea HPHT*. Bangkok, Thailand: IADC/SPE-170528-MS.
24. Prof. Adewale Dosunmu, S. a., & Nigeria, U. o. (2010). *Development of Environmentally Friendly Oil Based Mud using Palm- Oil and Groundnut-Oil* . Nigeria .
25. R.A.M. Amin, S. P., & D.K. Clapper, J. N. (2010). *Joint Development of an Environmentally Acceptable Ester-Based Drilling, SPE 132693* . Trinidad and Tobago: Baker Hughes.



26. (CORPOBID), C. p. (s.f.). *Características y usos de los aceites vegetales*.
Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Capitulo%202.pdf>
27. Alirio Benavides, P. B. (29 de 03 de 2007). *El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a16v74n153.pdf>
28. Arroyo Carretero, M. (2009). *Degradación térmica de aceites vegetales*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.
29. Calao Ruiz, J. E. (2007). *Caracterización ambiental de la industria petrolera: Tecnologías disponibles para la prevención de mitigación de los impactos ambientales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
30. Corpoica. (23 de 03 de 2011). *CORPOICA lanzó primera variedad colombiana de higuera para clima frío moderado*. Obtenido de http://www.corpoica.org.co/sitioWeb/Noticias/vernoticia.asp?id_noticia=1082
31. De Smet, E. a. (02 de 04 de 2015). *Extracción del aceite vegetal*. Obtenido de <http://www.dsengineers.com/es/sectores-de-actividades/procesamiento-aceites-vegetales/extraccion-de-aceite-vegetal.html>
32. Envitech, C. (2015). *Aplicaciones industriales del aceite de ricino*. Obtenido de <http://blog.condorchem.com/tag/aceite-de-ricino/>
33. Escuela preparatoria No. 14 Tezoyuca, México. (2009). *Biocombustible a través de Ricinus Communis*. México: XVII concurso universitario, "feria de las ciencias".
34. García Jaramillo, L., & Álvarez Yaguara, J. (2015). *Evaluación de la disminución de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos impregnados con residuos de fluidos de perforación base aceite de higuera y bases fuertes*. Neiva: Universidad Surcolombiana.



35. *Globalpetroprices.com*. (15 de 02 de 2016). Obtenido de http://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/
36. Guo, L. D. (2013). *Study of the rheological properties of various oil based drilling fluids*. Kuala Lumpur: University Teknologi PETRONAS.
37. INCONTEC. (2001). *Gestión ambiental. Guía para tratamientos de residuos de fluidos base aceite empleados en la perforación de pozos de petróleo*. Bogotá, Colombia: Instituto colombiano de certificación y normas técnicas.
38. Indupalma. (16 de 02 de 2016). *indicadores aceite de palma* . Obtenido de <http://www.indupalma.com/>
39. Ministerio de minas y energía . (2015). *Normatividad ambiental, fluidos de perforación* . Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/guias/GUIA%20X.pdf>
40. Mrielvis del carmen Ruiz Villegas, J. c. (05 de 2012). *Evaluación del impacto ambiental en aguas generado por los fluidos de perforación base aceite de soya y palma* . Obtenido de http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/4487/1/622.3381_R924a_01.pdf
41. Mundi, I. (08 de 02 de 2016). *Diesel precio diario* . Obtenido de <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=diesel>
42. Munevar, F. (1998). *Problema de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia* . Bogotá, Colombia.
43. Navas, D. A., & Andrea, R. P. (2010). *Procesos para la obtención de petróleo y los impactos ambientales generados por actividades petroleras*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.



44. Online, B. (2015). *Aceite de Ricino, Características, formas de producción y usos del aceite de ricino* . Obtenido de http://www.botanical-online.com/aceite_de_ricino.htm
45. Online, B. (s.f.). *Propiedades de los aceites vegetales* . Obtenido de http://www.botanical-online.com/aceites_vegetales_propiedades.htm
46. Phisic, S. (2016). *Grasas, Aceites, Acidos grasos, Trigliceridos* . Obtenido de <http://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas1.html>
47. Ramirez Jaramillo, L., & Cardenas Chala, D. (2005). *Evaluación del proceso de producción de la higuera como alternativa energética de bajo nivel de contaminación ambiental* . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander .
48. Ramirez, L. E., & Cardenas, D. L. (2005). *evaluación del proceso de producción de la higuera como alternativa energética de bajo nivel de contaminación ambiental* . Bucaramanga : Universidad Industrial De Santander .
49. Robello, S. (2014). *Drilling engineering, Solutions and applications* . United State: Friesens Corporation.
50. Ruiz Villegas, M. d., & Velasquez Mata, J. c. (2012). *evaluación del impacto ambiental en aguas generado por los fluidos de perforación base aceite de soya y palma* . Monagas, Venezuela: Universidad de oriente.
51. Universidad de Pamplona. (15 de mayo de 2006). *Caracterización termoanalítica de semillas de ricinus communis variedades mamona blanca, mamona negra y silvestre: Análisis de las propiedades reológicas del Biodiesel* . Obtenido de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2006/12_082010/rev_bistua_vol4_num1_art3.pdf



52. Terry Hemphill, S. B. (1996). *Hole Cleaning Capabilities of Water- and Oil-Base Drilling Fluids: A Comparative Experimental Study* . Houston.
53. Xiaoqing He, a. L. (2009). *Research on The Application of Environment Acceptable Modified Natural Macromolecule Based Drilling Fluid* . China University of Petroleum (Beijing) .
54. Gardner Denver (10 de marzo 2016) *Drilling pump/Mud pump PZ9 (PZJ) Pump Model*. Obtenido de <http://www.gardnerdenverpumps.com/pumps/drilling/pz9/>



ANEXO A

PROCEDIMIENTOS PARA LA MEDICION DE LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS.

ENVEJECIMIENTO

Esta prueba se realizó cumpliendo el siguiente procedimiento:

1. Colocar dentro de la celda de envejecimiento 350 cc de lodo.
2. Cerrar la celda girando fuertemente la tapa y a través de la válvula de la celda colocada en la tapa se presuriza su contenido con 150 psi, luego se cierra la válvula de la celda.
3. Una vez presurizada la celda se procede a introducirla dentro del horno acostado sobre los rodillos y se coloca a 300 °F con el regulador de temperatura.
4. Se enciende el motor que le proporciona el movimiento a los rodillos los que generan que la celda también gire sobre ellos, se cierra el horno y se deja por un lapso de 16 horas continuas.
5. Una vez cumplidas las 16 horas, se apaga el motor, y el horno, y se extrae la celda con cuidado.
6. Esperar que la temperatura se enfríe hasta la temperatura ambiente.
7. Se procede a despresurizar la celda abriendo la válvula de seguridad.



8. Desenroscar la tapa de la celda, pasar el contenido de la celda a un envase, y se procede a realizar las pruebas reológicas, de filtrado, y estabilidad eléctrica.

DENSIDAD.

El procedimiento en la determinación de la densidad de los fluidos utilizados en el trabajo es el siguiente:

1. Colocar la balanza en una superficie nivelada.
2. Verificar que el vaso de la balanza y la tapa del mismo estén secos y limpios.
3. Llenar el vaso con el lodo, colocar la tapa y verificar que una pequeña parte del lodo sea expulsado por el orificio que posee la tapa, para de esta manera asegurarse que no exista aire dentro del vaso y que todo el recipiente este lleno de lodo.
4. Limpiar todo el lodo sobrante en el exterior de la tapa.
5. Colocar la balanza sobre el soporte, el punto de apoyo en forma de cuchilla encaja para equilibrar el brazo. Con el contrapeso móvil se busca equilibrar el brazo, el mismo estará en equilibrio cuando la burbuja de nivel esté en el centro del nivel.
6. La densidad de la muestra se lee al borde del contrapeso móvil más cercana a la base de soporte, utilizando la escala de la balanza en lb/gal.

La balanza de lodo debe calibrarse periódicamente con agua dulce para asegurar su precisión. El agua dulce debe pesar 8,33 lb/gal.



REOLOGÍA.

El procedimiento en el cual se determinó las propiedades reológicas fue el siguiente:

1. Colocar el fluido en la copa térmica del viscosímetro.
2. Ajustar la temperatura de la copa Según el rango deseado en la prueba (°F)
3. Subir la copa térmica con el fluido hasta que el cilindro se sumerja en el lodo hasta la marca indicada para ello, (agujeros del cilindro).
4. El viscosímetro posee un control de velocidades, se selecciona la velocidad de 600 rpm y se espera hasta que se estabilice la lectura, y se toma la lectura del dial a esa velocidad.
5. Se cambia la velocidad de rotación a 300 rpm, y se toma la lectura del dial una vez que esta se haya estabilizado.
6. De igual forma se cambian las velocidades de rotación para obtener las lecturas de 200, 100, 6 y 3 rpm respectivamente.
7. La viscosidad aparente, se determina con la lectura de 600 rpm dividida por dos.
8. La viscosidad plástica, se determina al restar la lectura a 600 rpm con la lectura a 300 rpm.
9. El valor del punto cedente se obtiene, al restar la lectura a 300 rpm con la viscosidad plástica.



10. Para determinar la resistencia de gel a los 10 segundos, se le aplica una velocidad de 600 rpm al lodo por espacio de unos segundos, y se procede a detener el viscosímetro (0 rpm) por un lapso de 10 segundos y se registra la lectura del dial a una velocidad de 3 rpm. Este valor se reporta como la resistencia de gel a los 10 segundos.
11. Para determinar la resistencia de gel a 10 minutos y 30 minutos se procede de igual forma que el paso anterior.

DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD MEDIANTE EL USO DEL EMBUDO MARSH (Indicativo de viscosidad).

1. Tapamos la boquilla del embudo con un dedo y vertemos la muestra de lodo limpio por la parte superior del embudo llenamos hasta que el nivel del fluido alcance la marca.
2. Retiramos el dedo de la boquilla y tomamos tiempo. Medimos el tiempo en el que el lodo de perforación llene $\frac{1}{4}$ de galon (946 cc) en la copa (marca preestablecida).
3. Medimos la temperatura del fluido.
4. Reportamos el tiempo y volumen, como la medición de viscosidad marsh.

Nota: Para calibrar el embudo Marsh, se realiza una prueba con agua fresca, $\frac{1}{4}$ de galon debe ser llenado en 26 ± 0.5 segundos a una temperatura de $21 \pm 3^\circ\text{C}$.



FILTRADO HT-HP (HIGH PRESSURE HIGH TEMPERATURE)

Las características del fluido son afectados por la cantidad, tipo y tamaño de las partículas sólidas y por el agua emulsionada en el fluido, y por las propiedades de la fase líquida.

Existen dos procedimientos para la prueba de filtrado:

- Prueba a 175°C (350°F).
- Prueba de 175°C (350°F) a 230°C (450°F).

Si se desea realizar una prueba de filtrado a baja temperatura, se puede seguir el procedimiento para los lodos base agua establecido en la norma API13B-1.

Procedimiento:

1. Coloque el termómetro dentro de la camisa de calentamiento. Precalentamos la camisa aproximadamente 6°C (10°F) por encima de la temperatura de ensayo deseada. Posteriormente ajustamos la T° deseada.

Si la unidad de filtrado viene equipada con una termocopa que mide la temperatura, esta debe ser chequeada constantemente. Registrar si el método de la termocopa fue utilizado.

2. Revolvemos la muestra de fluido por 5 minutos utilizando el mixer. Instalamos el papel filtro en la celda y vertemos la muestra dejando por lo menos 2,5 cm (1 in) de espacio, para permitir la expansión del fluido.



3. Completamos el montaje de la celda con el filtro y verificamos que ambas válvulas (superior e inferior) están cerradas. Posteriormente colocamos el montaje en la camisa de calentamiento, ponemos el termómetro para monitorear la temperatura deseada.
4. Conectamos el vaso de recolección a la válvula inferior y la aseguramos. El vaso de recolección debe estar limpio, no debe haber rastros de aceite o de agua libre.
5. Conectamos la fuente de presión a la válvula superior. Conectamos una fuente de presión regulada al vaso de recolección, y nos aseguramos que las conexiones estén cerradas correctamente.
6. Manteniendo las válvulas cerradas, ajustamos la presión del regulador superior en 100 psi (690 kPa) más que la mínima contrapresión (ver tabla 2- Norma API13B2). Ajustamos el regulador inferior al valor mínimo de contrapresión, para realizar la prueba de temperatura mantenemos esta presión hasta que dicha prueba termine.
7. Cuando la muestra alcance la T° deseada, abrimos la válvula inferior e inmediatamente incrementamos la presión en el regulador superior a 500 psi (3450 kPa) más que la contrapresión. Esto iniciara el proceso de filtrado. Comenzamos a tomar tiempo, manteniendo la temperatura de prueba en un rango de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5^{\circ}\text{F}$). Si la contrapresión se eleva por encima de la contrapresión seleccionada para la prueba, cautelosamente vaciar y recoger una muestra de filtrado para reducir la contrapresión.
8. Colectamos el filtrado en un cilindro largo y graduado. Leemos el volumen en 30 minutos (VOLUMEN TOTAL). También leemos los volúmenes de las fases sólidas y acuosas, si los hay.



9. Inmediatamente después de tener el filtrado después de 30 minutos, cerramos las dos válvulas (superior e inferior), siguiendo siempre las instrucciones del fabricante, aliviamos presión de los reguladores, luego desconectamos el sistema de presurización. Removemos la celda de la camisa de calentamiento y dejamos que la celda se enfríe hasta 50°C (125°F). Mantener la celda hacia arriba durante el enfriamiento, la despresurización y desmontaje.

Se debe tener mucho cuidado en la despresurización de la celda, puede causar serias lesiones y hasta la muerte.

10. Sacamos el líquido de la celda.

11. Remover el cake o la torta que esta sobre el papel filtro. Medimos el espesor del cake, en su centro, debe medirse con mucho cuidado. Se realiza la medición en mm.

12. Registramos las características del cake, si este es anormalmente espeso o de textura gruesa, indicaciones de una posible sedimentación de sólidos durante la prueba. Para minimizar la sedimentación, los tiempos de calentamiento y enfriamiento deben reducirse al mínimo, además que el cake debe ser recuperado y analizado de inmediato.

13. Como último realizamos un pequeño cálculo dependiendo del área de filtro. El volumen de filtrado para los informes que se van a entregar deben estar en una área de filtro de 4560 mm² (7,1 in²) y las celdas HT/HP suelen tener un área de filtro de 2258 mm² (3,5 in²), en este caso el volumen debe ser el doble del obtenido para el informe correspondiente.

14. Reportamos el espesor de cake en milímetros.



ESTABILIDAD ELÉCTRICA.

El procedimiento para llevar a cabo las mediciones de estabilidad eléctrica es muy sencillo y se describe a continuación:

1. En el recipiente plástico agregar el fluido, el lodo debe estar a una temperatura de 150 °F.
2. Encender el aparato.
3. Introducir la pinza dentro del lodo, agitando constantemente la misma dentro del fluido.
4. Pulsar el botón test para realizar la lectura.
5. Se toma el valor dado en la pantalla del aparato.
6. Se oprime el botón reset para borrar de la pantalla el valor anterior.
7. Con la pinza en movimiento dentro de la muestra se vuelve a oprimir el botón test y se registra el nuevo valor.
8. Se repiten los pasos 6 y 7 hasta obtener 10 lecturas de estabilidad.
9. Se procede a promediar las diez lecturas para obtener el valor de la estabilidad eléctrica de la muestra.

PRUEBA DE RETORTA



Para la medición el contenido de aceite y agua de un lodo base aceite debe realizarse en un equipo calibrado y que este en óptimas condiciones de operación.

El conocimiento de la cantidad de sólidos, agua y aceite en el fluido es de vital importancia para análisis de las otras propiedades del fluido como lo son: reología, densidad, filtración, entre otras ya que estas se ven afectadas por la relación que halla entre estas variables, ya sea la relación agua/aceite W/O y en la parte de sólidos nos da una muy buena referencia para el diseño de control de sólidos.

PROCEDIMIENTO:

1. Nos aseguramos que la copa de la retorta, el conducto del condensador y el receptor de líquido estén totalmente limpios, secos y refrigerada de usos anteriores, nos aseguramos completamente que el interior de la copa y su tapa estén limpias, limpiando con una espátula antes de cada prueba. Podemos asegurarnos de la limpieza utilizando lana de acero. El pasaje de condensación debe limpiarse y secarse también antes de cada corrida mediante el uso de limpiadores especiales. Un aumento de material en el condensador puede disminuir la eficiencia de condensación y causar lecturas erróneas de la prueba.
2. Tomamos la muestra representativa de lodo base aceite y permitimos que se enfríe hasta aproximadamente 26°C (80°F). pasamos la muestra por una mala de 1.68 mm (0,066 in o 12-mesh) en el embudo marsh para remover material para perdida de circulación, escombros y cortes grandes.
3. Mezclamos el fluido para asegurarnos de la homogeneidad de la muestra. Se tiene que ser cuidadoso y evitar que entre aire al fluido y asegurarse que no queden sólidos en el fondo del contenedor.



4. Llenamos la copa de la retorta impidiendo que entre aire al fluido. Suavemente tapamos la copa para sacar el aire. Colocamos la tapa en la copa, giramos la tapa para obtener el ajuste correcto. Nos aseguramos que salga el pequeño exceso de lodo por el agujero de la tapa. Limpiamos el exceso de fluido.
5. Recubrimos el cuerpo de la retorta con lana de acero.
6. Aplicamos lubricante/sellador a la rosca de la copa de la retorta. Con la tapa en su lugar ajustamos a mano la copa de la retorta en el cuerpo del equipo.
7. Aplicamos lubricante/sellador a las roscas del vástago de la retorta y conectamos el condensador. Colocamos el ensamblaje de la retorta dentro de la camisa de calentamiento y cerramos la tapa aislante.
8. Encendemos la camisa de calentamiento, y permitimos que el ensamblaje corra por lo menos 45 minutos.

Si el fluido de perforación se desborda en el receptor, empacar el cuerpo retorta con una mayor cantidad de lana de acero y repita la prueba.
9. Removemos el líquido del receptor y lo dejamos enfriar. Registramos el volumen de aceite, el volumen de agua y el volumen de líquido.
10. Apagamos la camisa de calentamiento y dejamos enfriar antes de limpiar.

NOTA:

Si hay una emulsión presente entre el de aceite y agua, calentando la interfaz puede romper la emulsión. Como sugerencia, retire el ensamblaje de la camisa de calentamiento sujetando el condensador. Calentar con cuidado el receptor a lo largo de la banda de emulsión tocando suavemente el receptor para intervalos cortos con el ensamblaje caliente. Evite la ebullición del líquido. Después que la



interfaz de emulsión se rompa, permitir que el receptor de líquido se enfríe.
Registre el volumen de agua en el punto más bajo del menisco.



ANEXO B

INFORMACION TECNICA DE LOS PRODUCTOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DEL FLUIDO 100% ACEITE.

CARBONATO DE CALCIO	
Producto	Agente Formador de Puentes
Descripción del producto	Carbonato de calcio de tamaño seleccionado, se encuentra disponible en seis tamaños: 5, 25, 50, 150, 600 y 2300.
Aplicaciones/Funciones	*5, 25 y 50 pueden utilizarse para: Aumentar la densidad de lodos base agua y base aceite. Aumentar la densidad de las salmueras Formar puentes para reducir las pérdidas por filtración. *50, 150, 600 y 2300: Problemas de pérdida de circulación. Mezclas para inyección.
Ventajas	Totalmente soluble en soluciones de HCL 15%. Promueve eficazmente la formación de puentes.
Propiedades características	Apariencia: Polvo o gránulos de color blanco. Gravedad específica, aproximadamente de 2.7.

GLICEROL/GLICERINA	
Producto	Activador polar
Descripción del producto	Glicerol que mejora el rendimiento de los sistemas de perforación todo aceite y los sistemas de extracción de núcleos. Como en esos sistemas no hay agua agregada, el activador proporciona un ambiente en el cual los lignitos y arcillas organofílicas se desempeñan con eficacia. También suministra a los fluidos todo aceite un carácter osmótico similar a la alta salinidad de la fase acuosa.



Aplicaciones/Funciones	*Proporciona un ambiente donde los lignitos y arcillas organofílicas puedan actuar. *Proporcionar propiedades osmóticas
Ventajas	*Efectivo en bajas concentraciones *No es perjudicial para el medio ambiente *No necesita esfuerzo de corte
Propiedades características	*Apariencia, liquido de color claro *Gravedad específica, 1,26.
Tratamiento aconsejado	Agregar 0.5-1.5% en volumen para el tratamiento inicial cuando se utiliza un aditivo para el control de filtrado.
Presentación	Está disponible en baldes de 5 galones y en tambores de 55 galones.

GRAFITO	
Producto	Material obturante
Descripción del producto	El material flexible, angular de doble composición, a base de carbono, puede permitir que partículas empacadas ajustadamente bajo compresión en poros y fracturas se expandan o contraigan sin ser dislocadas o derrumbadas debido a cambios de presiones.
Aplicaciones/Funciones	*Ayuda a reducir torque y arrastre. *Ayuda a sellar formaciones porosas y fracturadas. *Ayuda a impartir lubricidad a fluidos base agua.
Ventajas	*Diseñado para prevención de perdida de circulación en fluidos de perforación base sintéticos y base agua. *Incrementa las presiones de propagación de fracturas en pruebas con muestras expuestas a fluidos base aceite y sintéticos. *Exhibe una flexibilidad que le permite deformarse a medida que la fractura. *Agregado en concentraciones de hasta 100 lbs/bbl detiene las pérdidas



	sin taponar el equipo de perforación o afectar adversamente las propiedades reológicas.
Propiedades características	*Apariencia, material angular negro. *Gravedad específica, 1,75. *Granulometría, (%<mall 40) 100 *Granulometría, (%<mall 200) 95
Tratamiento aconsejado	1. Como concentración básica para perdidas por filtración y control de pérdidas de circulación 15-25 lbs/bbl. 2. Como píldora obturante para emplazar sobre zonas de perdida ocasional en el fondo antes de hacer un viaje, 50-100 lbs/bbl. 3. Para lubricidad de fluidos base agua, 3-10 lbs/bbl.
Presentación	Está disponible en sacos de 50 lbs.

ARCILLA ORGANOFÍLICA	
Producto	Agente viscosificante
Descripción del producto	Aporta viscosidad y propiedades de suspensión a los fluidos de perforación base aceite. Es una arcilla bentonítica tratada con un compuesto de aminas a fin de aumentar su dispersión/rendimiento en los aceites. Este producto fue desarrollado para crear más rápidamente capacidad de suspensión y de acarreo de recortes en los lodos de aceite, con menor corte y temperaturas más bajas.
Aplicaciones/Funciones	*Viscosificar cualquier fluido de perforación base aceite. *Mejorar la limpieza de pozo durante las operaciones de perforación y completación. *Gelificar los lodos de aceite para suspensión de largo plazo.
Ventajas	*Estable a temperaturas próximas a los 350°F (177°C)



	*Contribuye al control del filtrado.
Propiedades características	*Apariencia, polvo de color castaño grisáceo. *Gravedad específica, 1,7.
Tratamiento aconsejado	Agregar con lentitud 2-15 lbs/bbl a través del embudo. Nota: Disminuir el tiempo para alcanzar su rendimiento, haciendo pasar simultáneamente una pequeña corriente de agua a través del embudo.
Presentación	Está disponible en bolsas de 50 lbs (22.7 kg)



ANEXO C

Diámetros para cálculo de CCI (Índice de acarreo).

Sección 12 1/4 "	
Diámetro Drill Pipe	5 in
Diámetro del Hueco	12,25 in
Diámetro del Revestimiento sección	9 5/8 in

Caudal (gal/min)	600
---------------------	-----

Velocidad Aullar	176,384 Ft/ min
------------------	-----------------

El BHA es el siguiente:

Sarta Caso 2 Sección 12 1/4					
Descripc	OD	ID	Top Conx.	WEIGHT	LONG
12HWDP	5.0"	3.0"	B4 1/2 IF	49,3	363,54
DRILLING JAR	6.750"	2.813"	B4 1/2 IF	100,77	31,37
15HWDP	5.0"	3.0"	B4 1/2 IF	49,3	449,71
FLOAT SUB	6.375"	2.375"	B4 1/2 IF	93,38	3,3
6 3/4 MPT W/DIR	6.750	1.92	B4 1/2 IF	112,09	20,02
3/4RL L W/GDR BWR+PWD	6.750"	1.92"	B4 1/2 IF	112,09	28,29
GEOPILOT 7600	7.375"	2.0"	B4 1/2 IF	134,88	29,04
Mecha #12	12.125"	2.0"	B4 1/2 IF	182,68	1,45

ⁱ La información de la sarta fue tomada de OPERACIONES PETROAMAZONAS-ACAL-13.