



Neiva. Junio 5 de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS \_\_\_\_\_, con C.C. No. 55.151.263 de Neiva \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

titulado VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE PERFORACION BASE ACEITE, presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL; 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.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### CARTA DE AUTORIZACIÓN



**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-06**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 2**

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.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: Constancia Vargas Bastillanos.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado: ALFREDO OLAYA

Firma:

Nombre Jurado: ALFREDO OLAYA

Firma:

Nombre Jurado: LUIS FERNANDO BONILLA

Firma:



- Plantas de frijol detuvieron su crecimiento y formación de hojas, al tercer día se marchita la planta. Plantas de *Swinglia*, ante OBM de diesel y palma, menor tasa de crecimiento, ante OBM de higuierilla se ve poco afectada. Plantas de ocobo, afectación fuerte con base diesel y palma y menor con base higuierilla.
- El LC50 para tilapia es de 5000 ppm a 72 horas (acpm), 96 hras (palma e higuierilla).
- Suelos tratados con humus, TPH<3 a 5 meses y TPH<1 a 6 meses de contaminados.

### Conclusiones

Aceite de higuierilla es susceptible de ser usado en lodos base aceite 100%, no genera daño ecológico de gravedad. Moderada a baja afectación a tilapia roja. Buena remediación con humus. Costos ambientales mínimos.

### ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

A sludge is formulated with 100% base of higuierilla oil, which meets operational requirements and constitutes a less harmful environmental agent.

### Methodology

- Sludge formulation. API RP 13B, at 65, 80 and 120 ° C.
- Survival and growth tests. 3 plant species (*Swinglia*, ocobo and bean), exposed to formulated fluid.
- 96LC50 test to red tilapia exposed to formulated fluid.
- Biodegradability test of exposed soil; Humus treatment, 180-day TPH measurement.
- Determination of environmental costs.

### Results

- Higuierilla oil can be used as base fluid in drilling muds. The mud, presents flat gels. With increasing temperature, rheology diminishes.
- General trend, non-Newtonian fluid, Power Act, shear forces decrease with increasing temperature. ICC> 1.
- Bean plants stopped their growth and formation of leaves, the third day the plant withers. Plants of *Swinglia*, before OBM of diesel and palm, lower rate of growth, before OBM of higuierilla is little affected. Plants of ocobo, strong affection with base diesel and palm and minor with base higuierilla.
- LC50 for tilapia is 5000 ppm to 72 hours (acpm), 96 hr (palm and fig).
- Soils treated with humus, TPH <3 to 5 months and TPH <1 to 6 months of contaminated.

### Conclusions

Hull oil is susceptible to be used in 100% oil based sludge, it does not generate ecological damage of gravity. Moderate to low affection to red tilapia. Good remediation with humus. Minimum environmental costs.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Word, Excel, acrobat

MATERIAL ANEXO: dos CD

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Aceite de ricino	Castor oil	6. _____	_____
2. Impacto ambiental	environmental impact	7. _____	_____
3. Floculación	Flocculation	8. _____	_____
4. saponificación	saponification	9. _____	_____
5. tiempo de rolado	rolling time	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Se formula un lodo 100% base aceite de higuera, que cumple requerimientos operacionales y constituye un agente menos nocivo ambiental.

Metodología

- Formulación lodo. API RP 13B, a 65, 80 y 120 °C.
- Pruebas supervivencia y crecimiento. 3 especies vegetales (Swinglia, ocobo y frijol), expuestas a fluido formulado.
- Prueba 96LC50 a tilapia roja expuesta a fluido formulado.
- Prueba biodegradabilidad de suelo expuesto; tratamiento con humus, medición de TPH a 180 días.
- Determinación costos ambientales.

Resultados

- El aceite de Higuera puede ser empleado como fluido base en lodos de perforación. El lodo, presenta geles planos. Con aumento de temperatura, disminuye reología.
- Tendencia general, fluido no newtoniano, Ley de Potencia, esfuerzos de corte disminuyen con aumento de temperatura. ICC >1.

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:**

VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE PERFORACION BASE ACEITE

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	CONSTANZA

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
BOTERO ROJAS	LUZ MARINA

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	JUAN PABLO
SANCHEZ GUTIERREZ	HECTOR ENRIQUE

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** MAGISTER EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL

**FACULTAD:** INGENIERIA

**PROGRAMA O POSGRADO:** MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2017

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 163

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

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

**VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL  
ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE  
PERFORACION BASE ACEITE**

**CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS  
CODIGO 20142132371**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL  
NEIVA 2017**

**VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL  
ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE  
PERFORACION BASE ACEITE**

**CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS  
CODIGO 20142132371**

Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al título  
de: Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental

Directora  
**Ms. LUZ MARINA BOTERO DE ROJAS**  
Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL  
NEIVA 2017**



## DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por darme cada día su soplo de vida, ser mi guía y mi sostén. A mi amado esposo Héctor Enrique Sánchez Gutiérrez, quién a cada instante me hace comprender la gran bendición de que sea mi compañero de vida, por su amor y apoyo incondicional, a mi amada hija Angélica María, luz de mis ojos, mi ángel de bendición. A Ustedes mil gracias por su paciente espera en mis días y noches de estudio, gracias por tanto amor.

*Constanza*

## **AGRADECIMIENTOS**

La Autora expresa sus agradecimientos a:

A Dios todopoderoso,

A la Universidad Surcolombiana, sus funcionarios.

A la Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, sus funcionarios.

A los jurados, Doctor Alfredo Olaya y Msc Luis Fernando Bonilla.

A los laboratorios de Fluidos de Perforación y Completamiento, Aguas, Suelos, Núcleos, Crudos y Derivados y Química, a sus coordinadores, monitores y laboratoristas.

A la empresa Fluidos y Servicios, a los ingenieros Vilmer España Guzmán y Ubaldo Vertucci, por su gran apoyo y permitir el uso de sus instalaciones, equipos y suministros.

A los ingenieros Carlos Andrés Portilla, Andrés Felipe Gaspar, Henry Alexander Norza, Juan Sebastián Campos, Luis Carlos García y Juan Sebastián Alvarez, coequiperos en este proyecto.

Al ing Juan Pablo Vargas Castellanos, asesor en fluidos. Gracias por sus conocimientos y por compartirlos conmigo.

A mi querida directora, Msc Ing Luz Marina Botero, por su constante apoyo.

A los ingenieros Luis Felipe Bermúdez y Jairo Rodríguez, mis asesores en manejo de plantas y peces.

Al ing. Héctor Enrique Sánchez Gutiérrez, por su asesoría en operaciones de perforación.

## TABLA DE CONTENIDO

		Pág
	RESUMEN	1
1	INTRODUCCION	4
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
3.	MARCO TEORICO	7
3.1	LOS FLUIDOS DE PERFORACION	7
3.1.1	Generalidades y funciones	7
3.1.2	Propiedades, ensayos y equipos usados para formular lodos base aceite	10
3.1.2.1	Densidad	10
3.1.2.2	Reología	10
3.1.2.3	Resistividad	13
3.1.2.4	Alcalinidad y pH	13
3.1.2.5	Pérdida de filtrado	14
3.1.2.6	Lubricidad	15
3.1.3	Modelos de flujo y reología	15
3.1.3.1	Tipos de fluidos	16
3.1.3.1.1	Fluidos newtonianos	16
3.1.3.1.2	Fluidos no newtonianos	16
3.1.3.2	Modelos reológicos	19
3.1.4	Equipos utilizados en la formulación del fluido de perforación	23
3.1.5	Formulación de un lodo de perforación base aceite convencional	27
3.1.5.1	Generalidades	27
3.1.5.2	Composición de los fluidos de perforación base aceite	28
3.1.5.2.1	Base de los aceites	28
3.1.5.2.2	Aditivos de los fluidos base aceite	29
3.1.6	Usos, ventajas y desventajas de los lodos base aceite	31

3.1.7	Aceites vegetales probados en fluidos de perforación	33
3.1.7.1	Características y propiedades de los aceites vegetales	34
3.1.7.2	Aceite de higuera	37
3.2	CONSIDERACION AMBIENTALES GENERALES	40
3.2.1	Antecedentes y regulaciones	40
3.2.2	Manejo, minimización y disposición de residuos base aceite	41
3.2.2.1	Las pruebas de toxicidad	41
3.2.2.2	Técnicas de minimización de desechos	42
3.2.2.3	Tratamiento y opciones de disposición	42
3.3	ESPECIES VEGETALES A CONSIDERAR	47
3.3.1	Especie nativa <i>tabebuia</i> (ocobo)	47
3.3.2	Especies usadas como linderos. <i>Swinglea glutinosa</i> (Limonsillo)	49
3.3.3	Especies comestibles. <i>Phaseolus vulgaris</i> (El frijol)	50
3.4	ESPECIE ACUATICA – <i>oreochromis niloticus</i> (mojarra roja).	51
3.5	SUELOS E HIDROCARBUROS (TPH)	55
3.5.1	Características de los suelos	55
3.5.2	Características del humus de lombriz californiana	57
3.5.3	Influencia del humus en biorremediación de hidrocarburos	58
3.6	DETERMINACION DE LOS COSTOS AMBIENTALES – METODO DE MINIMOS CUADRADOS ORDINALES	59
3.6.1	Modelo de asignación de costo	59
3.6.2	Valoración ambiental	62
3.6.3	Método de mínimos cuadrados ordinales	65
4.	FORMULACION DE UN LODO DE PERFORACION 100% BASE ACEITE DE HIGUERILLA	68
4.1	CARACTERIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA	68
4.1.1	Parámetros Característicos generales del aceite de higuera	69
4.1.2	Modelo reológico del aceite de higuera	69
4.2	ENSAYOS, EQUIPOS Y METODOLOGIA DE FORMULACION	72

4.2.1	Metodología de formulación del fluido de perforación	72
4.2.2	Equipos utilizados en la formulación del lodo base aceite de higuera	73
4.2.3	Ensayos y procedimientos de formulación del fluido	73
4.3	FORMULACION INICIAL	74
4.3.1	Selección de aditivos	74
4.3.2	Envejecimiento de los fluidos formulados	77
4.3.3	Estabilidad eléctrica	78
4.3.4	Control de pérdida de filtrado	78
4.3.5	Contenido de sólidos y líquidos - retorta	80
4.4	CARACTERIZACION REOLOGICA	81
4.4.1	Toma de parámetros reológicos y construcción de reogramas	82
4.4.2	Análisis de los modelos reológicos	83
4.4	INDICE DE CAPACIDAD DE ACARREO	85
4.5	PRUEBA NO CONVENCIONAL	86
4.6	COMPARACION DE LODOS BASE ACEITE DE HIGUERILLA, PALMA Y DIESEL	88
4.6.1	Características generales de aceites diese, de palma e higuera	88
4.6.2	Análisis comparativo de parámetros de los fluidos formulados	89
4.6.2.1	Formulación	90
4.6.2.2	Densidad	90
4.6.2.3	Estabilidad eléctrica	90
4.6.2.4	Reología	91
4.7	ENSAYO DE REDUCCION DE VISCOSIDAD	94
4.8	EVALUACION ECONOMICA DEL LODO FORMULADO	95
5.	ANALISIS AMBIENTAL DE LOS LODOS BASE ACEITE DE HIGUERILLA	97
5.1	COMPORTAMIENTO DE ESPECIES VEGETALES	97
5.1.1	Comportamiento de <i>phaseolus vulgaris</i> - frijol expuesto	97

5.1.1.1	Preparación, siembra y acciones preliminares	97
5.1.1.2	Observaciones	98
5.1.2	Comportamiento de la <i>swinglea glutinosa</i> – limoncillo expuesto	101
5.1.2.1	Preparación, siembra y acciones preliminares	101
5.1.2.2	Observaciones	102
5.1.3	Comportamiento de la <i>tebebuia rosea</i> – ocobo expuesto	106
5.1.3.1	Preparación, siembra y acciones preliminares	106
5.1.3.2	Observaciones	107
5.2	COMPORTAMIENTO DE <i>Oreochromis niloticus</i> (MOJARRA ROJA)	108
5.2.1	Preparación del ensayo	108
5.2.2	Comportamiento de <i>Oreochromis niloticus</i> ante ensayo 96LC50	111
5.3	DEGRADABILIDAD DE LOS SUELOS EXPUESTOS A CONTAMINACION	113
5.3.1	Preparación del ensayo	113
5.3.2	Comportamiento de la concentración de TPH en el suelo	116
6.	EVALUACION DE COSTOS AMBIENTALES	119
6.1	SELECCIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES	119
6.1.1	Indicadores de especies vegetales	119
6.1.2	Indicadores de especie acuática	119
6.1.3	Indicadores en suelos	119
6.2	VALORACION DE COSTO AMBIENTAL	120
6.2.1	Asignación de valor a los indicadores	120
6.2.2	Establecimiento de la base de datos de costos ambientales	121
6.2.3	Aplicación del método de mínimos cuadrados ordinales	121
6.3	RESULTADOS Y ANALISIS DEL COSTO AMBIENTAL	122
7.	CONCLUSIONES	124
7.1	FORMULACION DEL LODO	124

7.2	ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO AMBIENTAL	125
7.3	EVALUACION DEL COSTO AMBIENTAL	126
8.	RECOMENDACIONES	127
9.	BIBLIOGRAFIA	128
10.	ANEXOS	138

## LISTA DE ANEXOS

		Pág
ANEXO A.	BASE DE DATOS DE COSTOS AMBIENTALES	139
ANEXO B.	APLICACIÓN DEL METODO DE MINIMO CUADRADOS ORDINALES	156
ANEXO C.	CALCULO DE INDICE DE CAPACIDAD DE ACARREO	158
ANEXO D.	INVESTIGACIONES SOBRE ACEITES VEGETALES USADOS EN FLUIDOS DE PERFORACION	159
ANEXO E.	FICHA TECNICA ABONO CEAGRODEX	162
ANEXO F.	FICHA TECNICA HUMUS	163



## LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág
1.	Clasificación de los lodos de perforación de acuerdo a la constitución de la fase continua	6
2.	Balanza de lodos – medición de densidad	9
3.	Viscosímetro rotatorio – medición de reología	10
4.	Filtroprensas API y HP-HT	14
5.	Lubricity Tester [SPE-164049] y equipo SEM [SPE-164049]	14
6.	Tensión de corte vs velocidad de corte para un fluido newtoniano	15
7.	Viscosidad vs esfuerzo de corte - fluido newtoniano	15
8.	Comportamiento de fluido newtoniano y fluidos no-newtonianos independientes del tiempo	16
9.	Comportamiento fluido tixotrópico	17
10.	Gráfico de datos tabla 1	19
11.	Modelos reológicos – coordenadas rectangulares	21
12.	Viscosímetro de 8 velocidades, termocopa y viscosímetro HP-HT	22
13.	Filtroprensa HP-HT	23
14.	Horno y celda de envejecimiento	23
15.	Balanza de lodo	23
16.	Retorta	24
17.	Equipo de estabilidad eléctrica	24
18.	Mezcladora de lodo	24
19.	Estructura química del ácido oleico y glicerol	31
20.	Triglicéridos	31
21.	Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel	33
22.	Morfología de <i>litopenaeus setiferus</i> y <i>Litopenaeus vannamei</i>	38
23.	Ocobo	44
24.	Alevín	48
25.	Relación entre los distintos tipos de valores ambientales	58
26.	Valor económico total	59
27.	Valoración de la variable ambiental	60
28.	Relación de rata de corte vs velocidad de corte, pruebas preliminares. Aceite de higuera	71

29.	Relación rata de corte vs velocidad de corte. Pruebas preliminares aceite de higuera log-log	71
30.	Proceso metodológico en la formulación del lodo base aceite de higuera	72
31.	Reograma de las 9 formulaciones de fluido de perforación base aceite de higuera	75
32.	Fluido de perforación base aceite de higuera.	78
33.	Filtrado OBM 30 mL 10 ppg, 120 lb/bbl de CaCO <sub>3</sub> malla 400/600.	79
34.	Reograma de los lodos formulados de 9 y 10 ppg, envejecidos	80
35.	Filtrado OBM 1,9 mL 10 ppg 65 lb/bbl de CaCO <sub>3</sub> malla 150/400 post envejecimiento a 300°F y 100 psi	80
36.	Reograma consolidado del lodo de 9 ppg a varias temperaturas	83
37.	Reograma consolidado del lodo de 10 ppg a varias temperaturas	83
38.	Equipo OFITE 77. Viscosímetro HT-HP	86
39.	Prueba de compatibilidad OBM de higuera y fluido de confinamiento	86
40.	Comportamiento reológico OBM higuera- OFITE 77.	87
41.	Valores reológicos OBM higuera- OFITE 77	87
42.	Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel	89
43.	Test de estabilidad eléctrica. Al OBM de higuera	91
44.	Fluido formulado con aceite diesel	92
45.	Reograma fluido base aceite de palma	93
46.	Reograma fluido base aceite de higuera	93
46.	Comparación viscosidades plásticas OBM de higuera y palma	88
47.	Perfiles de viscosidad Aceite de higuera - reducción de viscosidad con metanol	94
48.	Comparación YP OBM de higuera y palma	90
49.	Día 1 y día 3 de aplicación de OBM diesel a plantas de frijol	99
50.	Día 1 y 3 de aplicación de OBM de palma a plantas de frijol	99
51.	Día 1 y 3 de aplicación de OBM de higuera a plantas de frijol	100
52.	Crecimiento de planta de frijol después de exposición a los lodos	100
53.	Número de hojas planta de frijol después de exposición a los lodos	100
54.	Establecimiento de las plantas de swinglea	101

55.	Crecimiento limoncillo después de exposición a los lodos	103
56.	Crecimiento limoncillo después de exposición a los lodos	104
57.	<i>Tebebuia rosea</i> de 25 cms para iniciar la experimentación y en crecimiento	107
58.	Variación de crecimiento y follaje de los ocobos expuestos a derrame accidental	108
59.	Compra de alevinos piscícola de Ing. Rodríguez	109
60.	Acuario principal, alevinos antes de ensayos.	109
61.	Quebrada La Raya. Sitio de captación de agua	110
62.	Medición de pH	111
63.	Caracterización de peces fallecidos en ensayos	112
64.	Pecera contaminada con lodo base aceite de higuera	113
65.	Zona de extracción del suelo, finca La Bonita.	114
66.	Humus líquido y muestra agregada a cada recipiente	114
67.	Montaje para aplicación de humus y entrada de oxígeno	115
68.	Disminución de TPH sin tratamiento	117
69.	Disminución de TPH con tratamiento con humus	117
70.	Disminución de TPH en suelos contaminados con lodo base aceite de higuera con y sin tratamiento	117

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág
1.	Ejemplo datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte	19
2.	Costos de aditivos en un lodo base aceite tipo	29
3.	Clasificación de aceites vegetales	31
4.	Propiedades de los aceites vegetales	32
5.	Composición del aceite de higuierilla	34
6.	Propiedades del aceite de higuierilla	35
7.	Resultado evaluación aceite de higuierilla	36
8.	% wt de cal requerida de acuerdo al contenido de aceite	40
9.	Rangos óptimos de parámetros fisicoquímicos para la tilapia	49
10.	Propiedades del aceite de higuierilla	69
11.	Pruebas preliminares del aceite de higuierilla	70
12.	Equipos utilizados en los ensayos	73
13.	Orden y tiempo de mezcla del proyecto	73
14.	Formulación inicial del fluido de perforación base aceite de higuierilla	74
15.	Propiedades reológicas de los fluidos de perforación base aceite de higuierilla formulados (lb/100ft <sup>2</sup> )	75
16.	Activadores polares usados en el proyecto	76
17.	Reología a diferentes temperaturas	77
18.	Ensayos de controladores de pérdida de filtrado	78
19.	Diseño 1. Formulación con controlador de pérdida de filtrado. 10 ppg	79
20.	Diseño 2. Formulación con controlador de pérdida de filtrado. 9 ppg	79
21.	Propiedades OBM. Lodos envejecidos por 16 horas	80
22.	Sólidos y líquidos –retorta. Lodos envejecidos por 16 horas	81
23.	Datos reológicos consolidados de los lodos de 9 y 10 ppg formulados	82
24.	Datos reológicos de los lodos de 9 y 10 ppg formulados envejecidos	84
25.	Índice de capacidad de acarreo. Caudal 500 gal/min	85
26.	Índice de capacidad de acarreo. Caudal 900 gal/min	85
29.	Propiedades de los aceites de higuierilla, palma y diesel.	88

30.	Formulación general (óptima).	90
31.	Comparación de densidades	90
32.	Comparación reología lodo a base aceites palma e higuierilla	91
33.	Análisis reológico de los lodos base aceites vegetales	92
34.	VP al usar metanol al 10%	94
35.	Costos formulación general (optima)	95
36.	Observaciones plantas de frijol ante derrame de OBM diesel y palma	98
37.	Observaciones plantas de frijol ante derrame accidental de lodo base aceite de higuierilla y sin derrame	99
38.	Crecimiento en centímetros plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma	102
39.	Crecimiento en centímetros plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuierilla y sin contaminar	102
40.	Follaje plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma	103
41.	Follaje plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuierilla y sin contaminar	104
42.	Código de color de hojas de limoncillo	105
43.	Coloración hojas plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma	105
44.	Coloración hojas plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuierilla y sin contaminar	106
45.	Observaciones de los ocbos al ser expuestos a derrame accidental	107
46.	Caracterización del agua de la quebrada La Raya.	110
47.	Comportamiento de exposición a OBM de los alevines de tilapia roja	111
48.	Clasificación toxicológica de los lodos según Hodge y Sterner	113
49.	Caracterización de los suelos a tratar	115
50.	Comportamiento de TPH en el suelo expuesto a contaminación	116
51.	Porcentaje de disminución de TPH	116
52.	Valoración de indicadores para especies vegetales	120
53.	Valoración indicadores del suelo	121
54.	Coeficientes calculados	122

## ANEXOS

## RESUMEN

**TITULO:** VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE PERFORACION BASE ACEITE.

**AUTOR:** Constanza Vargas Castellanos.

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

### **DESCRIPCIÓN:**

Como respuesta a las recurrentes inquietudes acerca de la poca amigabilidad ambiental de las operaciones petroleras, surge la inquietud de buscar soluciones ambientales y mejoras operacionales que minimicen la afectación ambiental, por lo que se plantea la posibilidad de formular un lodo de perforación cuya base sea un aceite vegetal que permita cumplir con los requerimientos operacionales y por su misma condición vegetal constituya un agente menos nocivo en términos ambientales. Esta inquietud se viene contemplando no solo en Colombia sino en muchas partes del mundo, por lo que en la última década se ha experimentado con aceites vegetales de palma, soya, jatropha, maní e higuierilla, los cuales han sido probados como biocombustibles y como fase continua en lodos base aceite, sin obtener resultados contundentes debido a su inestabilidad que conlleva una rápida descomposición al ser expuestos a altas temperaturas, siendo el aceite de higuierilla el que presentaba un mejor espectro de estabilidad.

Dicha estabilidad del aceite de ricino (Higuierilla) es resultado de su composición en un 90% de ácido ricinoléico (ácido 12-hidroxi-9-cis-octadecenoico) el cual contiene un radical hidroxilo que lo hace soluble en alcohol a baja temperatura, es muy viscoso y con propiedades que lo hacen estable a condición ambiente, con alto punto de ebullición y baja toxicidad. El hecho de su estabilidad y solubilidad en alcohol a baja temperatura, permite pensar en la posibilidad de que no se produzca la esterificación a altas temperaturas.

Con base en las características del aceite de higuierilla, existe un fundamento para prever que su comportamiento como base en un fluido de perforación, permite su formulación bajo características de operabilidad y su condición no toxica (LD50 de 200 mg/Kg en ratas - HEESS, 2013) plantea la amigabilidad ambiental.

La valoración de la operabilidad en el uso del aceite de higuera como fase continua en lodos base aceite, se realiza como una primera aproximación al comportamiento en un fluido formulado con fase aceitosa al 100%, considerando la afectación del comportamiento de dicho fluido formulado al exponerse a temperaturas de 65°C, 80°C y 120°C, buscando determinar la estabilidad del lodo a través de los ensayos del API RP 13B-2.

El componente ambiental se plantea bajo la premisa de un derrame accidental del lodo formulado en diferentes ambientes, tanto terrestres como acuáticos, para lo que se plantea la evaluación de la supervivencia de tres especies vegetales, una especie nativa, *tabebuia rosea* (ocobo), una especie usada como lindero, *swinglea glutinosa* (limoncillo) y una especie comestible, *phaseolus vulgaris* (frijol); y de una especie animal, alevinos de tilapia roja. Y con base en los resultados obtenidos, se procede a la determinación de los costos ambientales dando un valor económico a cada proceso analizado considerando indicadores ambientales y se procede a determinar el costo ambiental de estas situaciones, utilizando Excel como base de datos y el método de los mínimos cuadrados ordinales como método estadístico.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** TECHNICAL ASSESSMENT - ENVIRONMENTAL CASTOR OIL UTILIZATION IN MANUFACTURING BASE OIL DRILLING MUD

**AUTHORS:** Constanza Vargas Castellanos.

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

## **DESCRIPTION:**

In response to recurring concerns about the lack of environmental friendliness of oil operations, the concern of seeking environmental solutions and operational improvements that minimize environmental involvement arises, so the possibility of formulating a drilling mud arises the basis to be a vegetable oil that can effectively meet operational requirements and the same plant condition constitutes a less environmentally harmful agent. This concern has been contemplating not only in Colombia but in many parts of the world, so in the last decade has experimented with vegetable oil palm, soya, jatropha, peanut and castor, which have been tested as biocombustibles and as phase continuous oil muds without obtain conclusive results because of instability leading to a rapid decomposition when exposed to high temperatures, with the castor oil which showed better stability spectrum. Such stability of castor oil (Castor) is a result of composition 90% ricinoleic acid (-hydroxy-9 cis-



octadecenoic 12-acid) which contains a hydroxyl radical that it is soluble in alcohol at low temperature, is very viscous and with properties that make stable at ambient condition, with high boiling and low toxicity. The fact the stability and solubility in alcohol at low temperature, suggests the possibility that the esterification does not occur at high temperatures.

Based on the characteristics of castor oil, there is a basis to predict their behavior as the basis for a drilling fluid, allow the formulation under characteristics of operability and its non-toxic condition (LD50 200 mg / kg in rats - HEES, 2013) raises environmental friendliness.

The assessment of operability in the use of castor oil as the continuous phase in oil base mud is carried out as a first approach to behavior in a fluid formulated with oil phase 100%, considering the effect on behavior of said fluid formulated when exposed to temperatures of 65 ° C, 80 ° C and 120 ° C, seeking to determine the stability of the sludge through the API RP 13B test-2.

The environmental component arises under the premise of an accidental spill of sludge formulated in different environments, both terrestrial and aquatic, for the evaluation of the survival of three plant species, a native species and beans arises, and of a kind animal, red tilapia fingerlings. And based on the results obtained, we proceed to the determination of environmental costs giving an economic value to each process analyzed considering environmental indicators and proceed to determine the environmental cost of these situations, using Excel as a database and method of ordinal as least squares statistical method.

## RESUMEN

**TITULO:** VALORACION TECNICA – AMBIENTAL DE LA UTILIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA EN LA FABRICACION DE LODOS DE PERFORACION BASE ACEITE.

**AUTOR:** Constanza Vargas Castellanos.

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

### **DESCRIPCIÓN:**

Como respuesta a las recurrentes inquietudes acerca de la poca amigabilidad ambiental de las operaciones petroleras, surge la inquietud de buscar soluciones ambientales y mejoras operacionales que minimicen la afectación ambiental, por lo que se plantea la posibilidad de formular un lodo de perforación cuya base sea un aceite vegetal que permita cumplir con los requerimientos operacionales y por su misma condición vegetal constituya un agente menos nocivo en términos ambientales. Esta inquietud se viene contemplando no solo en Colombia sino en muchas partes del mundo, por lo que en la última década se ha experimentado con aceites vegetales de palma, soya, jatropha, maní e higuera, los cuales han sido probados como biocombustibles y como fase continua en lodos base aceite, sin obtener resultados contundentes debido a su inestabilidad que conlleva una rápida descomposición al ser expuestos a altas temperaturas, siendo el aceite de higuera el que presentaba un mejor espectro de estabilidad.

Dicha estabilidad del aceite de ricino (Higuera) es resultado de su composición en un 90% de ácido ricinoléico (ácido 12-hidroxi-9-cis-octadecenoico) el cual contiene un radical hidroxilo que lo hace soluble en alcohol a baja temperatura, es muy viscoso y con propiedades que lo hacen estable a condición ambiente, con alto punto de ebullición y baja toxicidad. El hecho de su estabilidad y solubilidad en alcohol a baja temperatura, permite pensar en la posibilidad de que no se produzca la esterificación a altas temperaturas.

Con base en las características del aceite de higuera, existe un fundamento para prever que su comportamiento como base en un fluido de perforación, permite su formulación bajo características de operabilidad y su condición no tóxica (LD50 de 200 mg/Kg en ratas - HEES, 2013) plantea la amigabilidad ambiental.

La valoración de la operabilidad en el uso del aceite de higuerilla como fase continua en lodos base aceite, se realiza como una primera aproximación al comportamiento en un fluido formulado con fase aceitosa al 100%, considerando la afectación del comportamiento de dicho fluido formulado al exponerse a temperaturas de 65°C, 80°C y 120°C, buscando determinar la estabilidad del lodo a través de los ensayos del API RP 13B-2.

El componente ambiental se plantea bajo la premisa de un derrame accidental del lodo formulado en diferentes ambientes, tanto terrestres como acuáticos, para lo que se plantea la evaluación de la supervivencia de tres especies vegetales, una especie nativa, *tabebuia rosea* (ocobo), una especie usada como lindero, *swinglea glutinosa* (limoncillo) y una especie comestible, *phaseolus vulgaris* (frijol); y de una especie animal, alevinos de tilapia roja. Y con base en los resultados obtenidos, se procede a la determinación de los costos ambientales dando un valor económico a cada proceso analizado considerando indicadores ambientales y se procede a determinar el costo ambiental de estas situaciones, utilizando Excel como base de datos y el método de los mínimos cuadrados ordinales como método estadístico.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** TECHNICAL ASSESSMENT - ENVIRONMENTAL CASTOR OIL UTILIZATION IN MANUFACTURING BASE OIL DRILLING MUD

**AUTHORS:** Constanza Vargas Castellanos.

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

## **DESCRIPTION:**

In response to recurring concerns about the lack of environmental friendliness of oil operations, the concern of seeking environmental solutions and operational improvements that minimize environmental involvement arises, so the possibility of formulating a drilling mud arises the basis to be a vegetable oil that can effectively meet operational requirements and the same plant condition constitutes a less environmentally harmful agent. This concern has been contemplating not only in Colombia but in many parts of the world, so in the last decade has experimented with vegetable oil palm, soya, jatropha, peanut and castor, which have been tested as biocombustibles and as phase continuous oil muds without obtain conclusive results because of instability leading to a rapid decomposition when exposed to high temperatures, with the castor oil which showed better stability spectrum. Such stability of castor oil (Castor) is a result of composition 90% ricinoleic acid (-hydroxy-9 cis-

octadecenoic 12-acid) which contains a hydroxyl radical that it is soluble in alcohol at low temperature, is very viscous and with properties that make stable at ambient condition, with high boiling and low toxicity. The fact the stability and solubility in alcohol at low temperature, suggests the possibility that the esterification does not occur at high temperatures.

Based on the characteristics of castor oil, there is a basis to predict their behavior as the basis for a drilling fluid, allow the formulation under characteristics of operability and its non-toxic condition (LD50 200 mg / kg in rats - HEES, 2013) raises environmental friendliness.

The assessment of operability in the use of castor oil as the continuous phase in oil base mud is carried out as a first approach to behavior in a fluid formulated with oil phase 100%, considering the effect on behavior of said fluid formulated when exposed to temperatures of 65 ° C, 80 ° C and 120 ° C, seeking to determine the stability of the sludge through the API RP 13B test-2.

The environmental component arises under the premise of an accidental spill of sludge formulated in different environments, both terrestrial and aquatic, for the evaluation of the survival of three plant species, a native species and beans arises, and of a kind animal, red tilapia fingerlings. And based on the results obtained, we proceed to the determination of environmental costs giving an economic value to each process analyzed considering environmental indicators and proceed to determine the environmental cost of these situations, using Excel as a database and method of ordinal as least squares statistical method.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la valoración técnica y ambiental de la utilización del aceite de higuera como fase continua en lodos de perforación base aceite.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular un lodo 100% base aceite de higuera, bajo estándares operativos y comparar el comportamiento del lodo formulado con un lodo base aceite convencional.
- Evaluar la supervivencia de dos especies vegetales y una especie acuática, expuestas a un derrame accidental de los residuos del lodo base aceite de higuera.
- Evaluar la degradabilidad del aceite de higuera en suelos expuestos a un derrame accidental de lodo base aceite de higuera.
- Determinar los costos ambientales por la utilización del aceite de higuera como fase continua en lodos de perforación.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 LOS FLUIDOS DE PERFORACION

##### 3.1.1 Generalidades y funciones

Los fluidos de perforación son líquidos o gases que circulan en los pozos perforados, por el interior de la tubería de perforación, hasta salir a través de los jets o boquillas de la broca y retornar por el espacio anular entre el exterior de la tubería de perforación y la pared del hueco abierto (o revestido, dependiendo de la etapa de perforación) hasta llegar a superficie, llevando consigo los sólidos perforados durante este proceso.

Los fluidos de perforación son diversos tipos de fluidos con características físicas y químicas específicas, que se componen de una fase sólida o dispersa y una líquida o continua, en general constituida por agua, aceite o gas (aire). El fluido no debe ser tóxico, corrosivo ni inflamable, pero si debe ser inerte a las contaminaciones con sales solubles o minerales, debe ser inmune al desarrollo de bacterias y estable a altas temperaturas, conforme a las exigencias de las operaciones.

De acuerdo al tipo de fluido que conforma la fase continua del lodo, estos pueden clasificarse en fase líquida, fase gaseosa o una mezcla de ellos, tal como se indica en la figura 1.

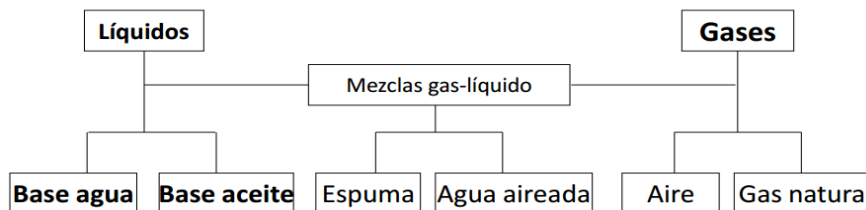


Figura 1. Clasificación de los lodos de perforación de acuerdo a la constitución de la fase continua

Fuente: Manual Baroid, 1998

Los fluidos de perforación cuentan con una fase continua que puede ser agua, aceite, gas o una mezcla de ellos y una fase dispersa constituida por una mezcla de sólidos, líquidos y químicos. Algunos sólidos reaccionan con la fase continua y los químicos disueltos, son llamados sólidos reactivos, en su mayoría arcillas hidratables, en tanto que otros sólidos no reaccionan siendo llamados sólidos inertes. Cualquier aceite agregado al lodo base agua se emulsiona manteniéndose en pequeñas gotas (emulsión aceite en agua) y cuando la fase continua es aceite y se tienen pequeñas gotas de agua, se denominan emulsión agua en aceite. Los lodos base aceite evitan la corrosión,

problemas con arcillas sensibles aunque su costo inicial y de mantenimiento es elevado y cualquier manipulación inadecuada genera afectación ambiental.

La selección de los fluidos de perforación está sujeta a los tipos de formaciones perforadas, al rango de temperaturas, esfuerzos, permeabilidad y presiones de las formaciones, al procedimiento de evaluación de formaciones a realizarse una vez perforado el pozo y a las condiciones ecológicas y ambientales. El éxito o fracaso de las perforaciones de pozos petroleros depende en gran medida del fluido de perforación; ya que este debe servir para controlar las presiones de las diversas formaciones que se van perforando y limpiar el hueco, entre otras funciones importantes.

Al retirar los cortes perforados desde el fondo del agujero, la velocidad de flujo en el espacio anular debe vencer el efecto de la gravedad, lo cual se estima entre 100 y 200 pies/min; y características como la densidad y la viscosidad, influyen en la capacidad transportadora del fluido (ICC índice de capacidad de acarreo). Estos sólidos extraídos del pozo deben retirarse del fluido para nuevamente ser bombeado, buscando mantener la capacidad de acarreo y evitar la erosión de los equipos y líneas tanto en superficie como en subsuelo. Cuando se detiene la circulación del fluido, los sólidos que se están transportando y el material pesado deben permanecer en suspensión, lo cual se logra con buenas propiedades tixotrópicas, es decir, que el fluido debe tener la capacidad de desarrollar resistencia de gel cuando se deja en reposo, pero permitirle regresar a su estado fluido al aplicarle agitación mecánica.

El fluido de perforación es un medio para transmitir potencia hidráulica a la broca, lo cual influye significativamente en la velocidad de penetración. Otro factor en el que incide la utilización del fluido es el enfriamiento y lubricación de la sarta de perforación, ya que esta al girar contra las paredes del agujero genera fricción y por consiguiente calor; el cual se intercambia con el fluido que ha sido bombeado desde superficie a una temperatura menor. Adicionalmente el fluido provee un medio lubricante que disminuye el torque y por ende la fricción.

Un buen fluido de perforación debe depositar una capa delgada y de baja permeabilidad sobre la pared del agujero perforado, llamada revoque, de tal manera que provea consolidación en las formaciones porosas y permeables (principalmente areniscas) y que minimice el paso de los fluidos a las mismas, puesto que la presión diferencial (presión hidrostática vs presión de formación) resultará en invasión del fluido hacia la formación variando sus características, lo que se conoce como daño a la formación, el cual dará como resultado la baja en la productividad del pozo. Este daño se expresa en el hinchamiento de arcillas por hidratación, bloqueo de los poros ya sea por sólidos y/o gotas de micro emulsión y cambios en la humectabilidad preferencial de la roca; lo que a su vez genera interferencia al efectuar los registros.

Paralelo a ello, la presión hidrostática del lodo debe ser suficiente para prevenir un brote o surgencia, por lo que la densidad del lodo (peso del lodo) constituye un factor de control, sumado a que la densidad del fluido imprime un efecto de flotabilidad a la sarta que se encuentra sumergida en ella.

Por otra parte, existen factores importantísimos a ser considerados y están asociados al paso de fluido de perforación hacia la formación; este fenómeno es inherente a dos procesos particulares, uno es la pérdida de filtrado o paso de la fase continua del fluido de perforación hacia los intersticios de la roca y otra el paso de las fases continua y dispersa hacia la formación llamado pérdida de circulación. Estas condiciones originan otros problemas en el pozo como el aumento del NPC (non productive cost), lo que operativamente se ve reflejado en pega e tubería (stuck pipe), inestabilidad del pozo, mala adherencia del cemento, arremetidas, entre otras.

La pérdida de filtrado, es un factor que se puede controlar modificando las características del fluido para que la cantidad de filtrado que pase a la formación sea la mínima posible y para que el revoque o cobertura impermeabilizante sobre la pared del pozo sea del menor espesor posible. La pérdida de circulación ocurre entre otros cuando el diámetro de partícula más grande de la fase dispersa es tres veces menor al diámetro de poro. Por otro lado, para controlar la pérdida de circulación el proceso se centra en la identificación de las formaciones susceptibles, ya sea por poseer poros muy grandes, desbalance en las presiones de formación, fracturas naturales e incluso fracturas inducidas; y en establecer medidas operacionales y correctivas para minimizar este fenómeno. Las medidas operacionales se centran en controlar el balance entre presiones de formación y presión ejercida por la columna de lodo e inducida por la acción de bombas y movimientos de la tubería dentro del hueco (suaveo o pistoneo); y las medidas correctivas se centran en la utilización de materiales punteantes que entrarían a taponar los poros o fracturas en la formación, entre los cuales se encuentra la cáscara de nuez, plástico, caliza, azufre,, perlita expandida, celofán, aserrín, heno de pradera, corteza, semilla de algodón y leña desmenuzada. Cuando se perfora zonas de pérdida, es muy recomendado hacerlo con lodos base aceite, inyectando un volumen suficiente para cubrir 50 pies arriba y abajo de la zona de pérdida, para lo cual se usa comúnmente la inyección a presión de tierra diatomácea, de carbonato de calcio granular y de arcilla organofílica.

Las características del lodo que están asociadas a la pérdida de filtrado y pérdida de circulación son: altos geles, bajo índice de capacidad de acarreo, revoque grueso, alta densidad o cambio brusco de densidad, asentamiento de material densificante y desbalance de la columna.



Los procesos operacionales que permiten la regulación de los parámetros son: romper circulación por etapas ante la presencia de geles progresivos, minimizar embolamiento de la broca y sarta, controlar la rata de perforación lo que permite mantener en control la incorporación de cortes al fluido, evitar la formación de revoques gruesos, usar fluidos inhibitorios, mantener presiones de bombas capaces de remover los cortes a medida que se va perforando, diseñar el fluido con el mínimo posible de viscosidad y geles que permita soportar el material densificante y los cortes y asegure una buena limpieza del pozo. Y por último, realizar las pruebas de integridad después de perforar entre 10 o 20 pies por debajo del zapato del revestimiento, con miras a verificar la cementación y determinar el gradiente de fractura de la formación adyacente.

### 3.1.2 Propiedades, ensayos y equipos usados para formular lodos base aceite

La caracterización de los fluidos de perforación base aceite se hace a través de la aplicación de la norma API-RP-13B-2, siendo los parámetros a medir la densidad, reología, resistividad, alcalinidad y pH, pérdida de filtrado y lubricidad.

#### 3.1.2.1 Densidad

La densidad de un lodo es el peso por unidad de volumen y puede expresarse como gradiente de densidad (presión por unidad de profundidad) en unidades de libra por pulgada cuadrada por pie (psi/ft) o kiloPascuales por metro (kP/m). Se mide de manera directa, utilizando una balanza de lodo, la cual es una balanza de triple brazo, con una copa con su tapa en un extremo en el cual se coloca el fluido a medir, y el contrapeso corredizo sobre la barra, el cual cuenta con una burbuja de nivelación y un brazo graduado para la medición, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Balanza de lodo – medición de densidad  
Fuente: Autora

#### 3.1.2.2 Reología

Definida por el profesor Bingham (Rheology, 1929) como la ciencia del flujo, el estudio de la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos; lo cual se determina de manera experimental a través de las propiedades

viscoelásticas que definen el comportamiento de flujo. En fluidos de perforación, estas propiedades reológicas, permiten determinar la capacidad de arrastre del fluido y la eficiencia de flujo del mismo y de manera indirecta permite visualizar cuando el fluido se encuentra contaminado pues sus características varían respecto a las de diseño.

Para hacer la caracterización reológica de un fluido es indispensable establecer el tipo de fluido y el modelo reológico que lo describe, lo cual se tratará más adelante, en el numeral 3.1.3.

Las propiedades fundamentales del lodo de perforación son la Viscosidad plástica, punto de cedencia y resistencia de gel. La medición de estas propiedades puede hacerse usando el viscosímetro Marsh y el reómetro o viscosímetro de tambor rotatorio (API RP 13B). El Embudo Marsh mide la velocidad expresada en segundos en que tarda  $\frac{1}{4}$  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.

Con el reómetro o viscosímetro de tambor rotatorio (ver Figura 3) se realizan mediciones de viscosidad plástica, punto de cedencia y resistencia de gel.

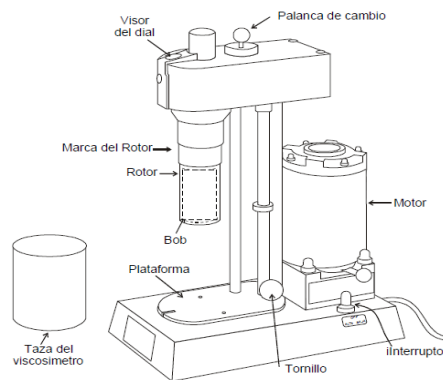


Figura 1. Viscosímetro Rotatorio – medición de reología  
Fuente: Fann equipments

La viscosidad Plástica (VP), INTEQ (1998), es una medida absoluta de la resistencia al flujo del fluido, causada principalmente por la fricción de las partículas suspendidas y la viscosidad de la parte fluida. La viscosidad plástica se expresa en centipoises y es afectada por la concentración, tamaño y forma de las partículas sólidas suspendidas en el lodo. Para encontrar el valor de la VP, se realizan dos lecturas a esfuerzos de 600 y 300 rpm, y se relacionan así.

$$VP \text{ (cp)} = \Theta_{600} - \Theta_{300}$$

El punto cedente (Yield Point – YP), INTEQ (1998), se expresa en unidades de lb/100 ft<sup>2</sup>, el YP es la parte de la resistencia al flujo, causada 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 refiere 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.

$$YP \text{ (lb/100 ft}^2\text{)} = \Theta 300 - VP$$

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, por su efecto en las presiones impelentes, por lo que debe monitorearse permanentemente durante la perforación.

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 cero (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/ft<sup>2</sup> o en Pa.

Los esfuerzos de gel no deben ser muy bajos, ya que no podrían mantener eficientemente los ripios desprendidos, durante las paradas de circulación. 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).

$$YS \text{ (lb/100ft}^2\text{)} = 2(\Theta 3) - \Theta 6$$

El valor de YS (yield strength) da una aproximación numérica a los valores de geles requeridos o deseados.

- 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.

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 cedencia. (Manual IMCO).

### 3.1.2.3 Resistividad.

Esta propiedad se refiere a la resistencia que tiene el fluido al paso de corriente eléctrica a través de él, en la toma de registros eléctricos si la fase líquida del lodo penetra profundamente en la formación o si el lodo ha erosionado el pozo física o químicamente, se dificulta visualizar las características de la formación o del fluido contenido (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.

### 3.1.2.4 Alcalinidad y pH.

El pH indica la alcalinidad o acidez que pueda tener un fluido, INTEQ (1998), en la escala entre 1 a 14, siendo 7 un pH totalmente neutro, teniendo 1 como el valor más ácido y 14 el valor más básico; siendo probable encontrar valores de acidez por debajo de 1. Los valores de pH usuales para un lodo de perforación son entre 8,0 10, aunque es posible observar lodos de 12.5 y 13. Mantener un valor básico de pH ayuda a cuidar la tubería de la corrosión, preservar y activar los aditivos del lodo y por supuesto mantener las propiedades reológicas. 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 llevar a la floculación del lodo; por tanto se puede presentar la aglomeración y sedimentación de partículas, lo que a su vez afectará 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 los acidez y los álcalis en el color de ciertos indicadores químicos colocados sobre tiras de papel pH, también se puede realizar una titulación y de esta manera se obtiene un

resultado directo y más confiable que el método colorimétrico; el segundo, es llamado electrométrico, se basa en el voltaje desarrollado entre dos electrodos (colocados en el mismo tubo vertical de vidrio).

### 3.1.2.5 Pérdida de filtrado.

Cuando se está perforando, el lodo al entrar en contacto con formaciones permeables, permite el paso de la fase continua para invadir los espacios porosos, en función con el diferencial de presión entre la presión hidrostática ejercida por el lodo y la presión de formación, permitiendo que los sólidos que constituyen la fase dispersa del lodo, se acumulen justo en la cara del hueco que está en contacto con el lodo. Esta acumulación de sólidos se denomina revoque (cake o torta) y es función de la concentración de sólidos en el lodo, de su distribución de tamaño y forma. El fluido que invade el medio poroso se denomina filtrado y el fenómeno por el cual ocurre la invasión se conoce como pérdida de filtrado. La velocidad con la que ocurre este fenómeno es función directa del diferencial de presión, la permeabilidad, la porosidad, las características de los sólidos presentes en el lodo, el tiempo de exposición (frente a la formación) y la temperatura, INTEQ (1998).

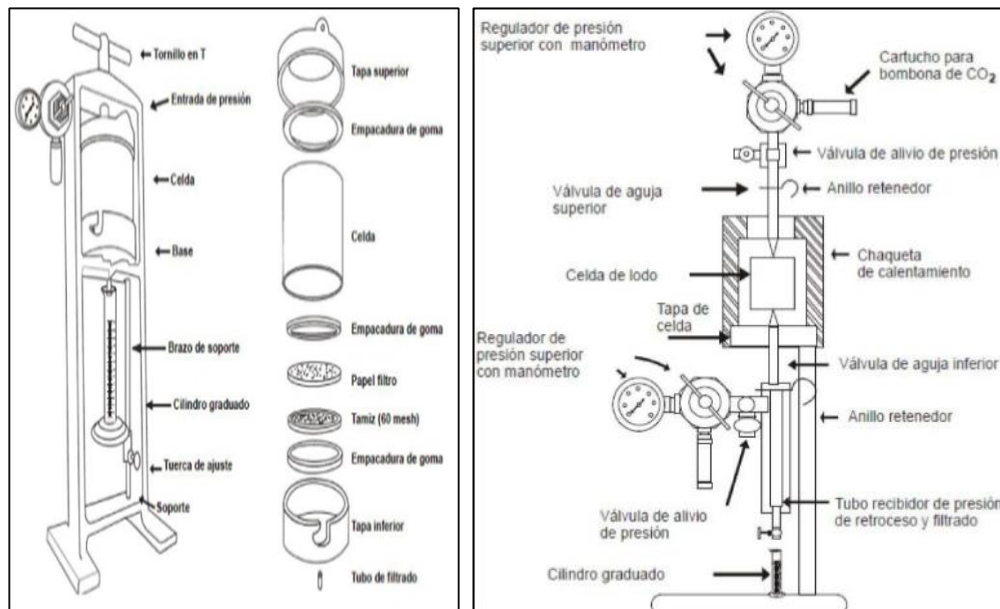


Figura 4. Filtro prensa API y HP-HT.  
Fuente: API RP 13B-2

Existen dos métodos para medir la pérdida relativa de filtrado, (API RP 13B); la prueba API estándar y la prueba de HT-HP, ver figura 4. En ambos métodos el lodo se coloca en una cámara que contiene un papel filtro en su parte inferior, la cámara es sellada herméticamente y se aplica una presión de un gas (CO<sub>2</sub>) 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 diferencial de 100 psi y de temperatura ambiente, la prueba HT-HP se realiza generalmente a 300°F y 500 psi de presión diferencial.

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 más altas, incluso haciendo 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 y Concentración de yeso.

#### 3.1.2.6 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, INTEQ (1998). Para evaluar la lubricidad se utiliza un equipo en el laboratorio llamado “lubricity tester” (API RP 13B), que puede simular la rotación de la tubería bajo condiciones de presión a las que se encuentra sometido el pozo, ver Figura 5. 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.



Figura 5. Lubricity Tester [SPE-164049] y equipo SEM [SPE-164049]  
Fuente: API RP 13B-2

#### 3.1.3 modelos de flujo y reología.

Para establecer la reología de un fluido es necesario tipificarlo y establecer el modelo de flujo, lo cual establece claramente Schlumberber (2003) y Chevron (2000), de donde se describen los conceptos a continuación.

### 3.1.3.1 Tipos de fluidos.

#### 3.1.3.1.1 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. 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:

$$\tau = -\mu * \frac{dv_x}{dy}$$

Al graficar el comportamiento de un fluido newtoniano se obtiene una línea recta con pendiente constante, ver Figura 6;

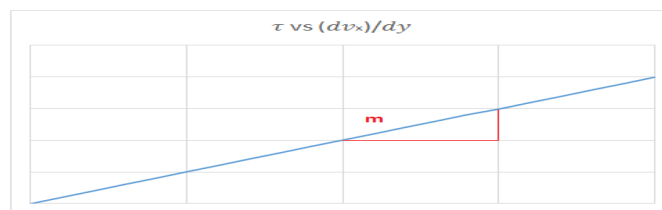


Figura 2. Tensión de corte vs velocidad de corte para un fluido newtoniano

Fuente: Chevron (2000)

La ecuación de esta recta es: Tensión de corte =  $m$  \* velocidad de corte. Donde  $m$  es la viscosidad del fluido, ya que esta permanece constante, por lo tanto de la gráfica viscosidad vs esfuerzo de corte se tiene (ver figura 7):

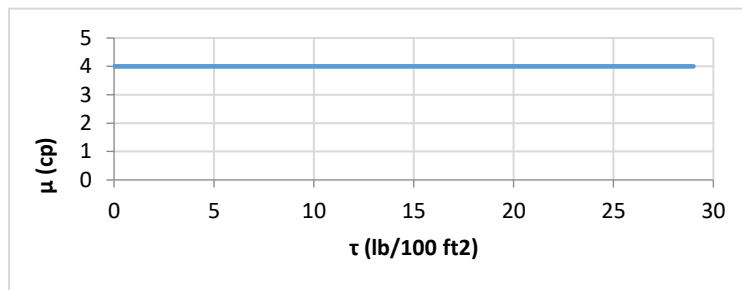


Figura 3. Viscosidad vs esfuerzo de corte - fluido newtoniano

Fuente: Chevron (2000)

#### 3.1.3.1.2 Fluidos no newtonianos.

Este tipo de fluidos se caracteriza 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: Fluidos independientes del tiempo y fluidos dependientes del tiempo (Chevron, 2000).

Los Fluidos 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, pueden ser fluidos plástico de Bingham, pseudoplásticos, dilatantes, pseudoplásticos y dilatantes con punto de cedencia (ver figura 8).

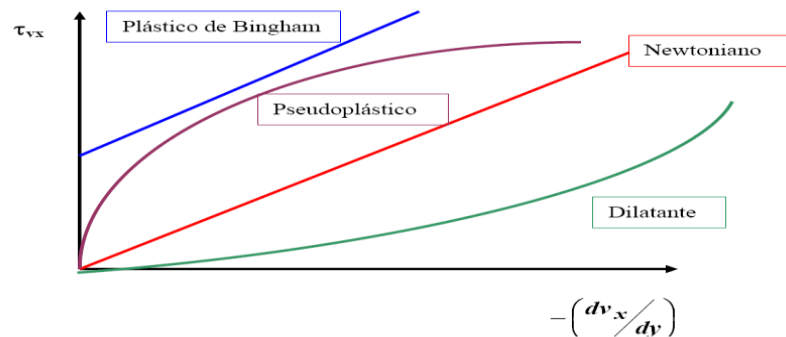


Figura 4. Comportamiento de fluido newtoniano y fluidos no-newtonianos independientes del tiempo.  
Fuente: Chevron (2000)

Los fluidos plástico de Bingham, son un caso idealizado de los fluidos no-Newtonianos, con 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.

Los fluidos pseudoplásticos, son un caso en donde un esfuerzo cortante de un valor infinitesimal es 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.

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

Para los fluidos dilatantes y pseudoplásticos con punto de cedencia, 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.



Los Fluidos dependientes del tiempo: Como su nombre lo indica, sus propiedades reológicas se ven afectadas por la duración del corte (esfuerzo cortante y velocidad de corte) y se dividen en fluidos tixotrópicos y reopécticos, Schlumberger (2003) y Chevron (2000).

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 ruptura 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 necesitará 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.

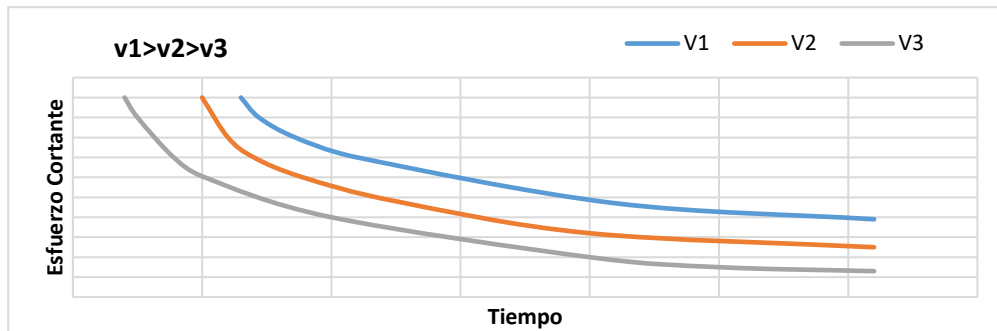


Figura 5. Comportamiento fluido tixotrópico  
Fuente: Chevron (2000)

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.

Los fluidos viscoelásticos, J Blanco (2013), 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. 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 ripios, 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.

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. En estos sistemas el punto cedente se mantiene en un rango de 10 a 20 lbs/100ft<sup>2</sup> y el gel inicial, corrido a 3 rpm, es alrededor de 5lbs/100pft<sup>2</sup>, en un lodo sin peso y mayor de 15lbs/100ft<sup>2</sup> 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.

### 3.1.3.2 Modelos reológicos.

La necesidad del ingeniero de fluidos de identificar el comportamiento del fluido ha tenido 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, es necesario utilizar un viscosímetro de velocidad variable; y ya que ningún lodo es exactamente igual a otro, ninguna ecuación matemática describe precisamente la reología de todos los lodos. Para encontrar la relación esfuerzo de corte – velocidad de corte, se llega a plantear ecuaciones que de cierta manera se acercan al comportamiento de los fluidos, estas ecuaciones o modelos deben cumplir estas condiciones (Chevron, 2000):

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

Siguiendo estas condiciones se han establecido tres modelos reológicos (Schlumberger, 2003): Modelo plástico de Bingham, modelo de la ley exponencial modificada y modelo de la ley exponencial (n y k).

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

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

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

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

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

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

Para relacionar estos parámetros, IMCO plantea un ejemplo de mediciones y establecimiento de propiedades reológicas, ver tabla 1 y figura 10.

Tabla 1. Ejemplo datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte

Veloc. Corte	Esfuerzo. Corte	$\mu$
rpm	lb/100 ft <sup>2</sup>	Cp
3	6	600
6	8	400
100	21	63
200	28	42
300	33	33
600	44	22

Fuente: (IMCO manual)

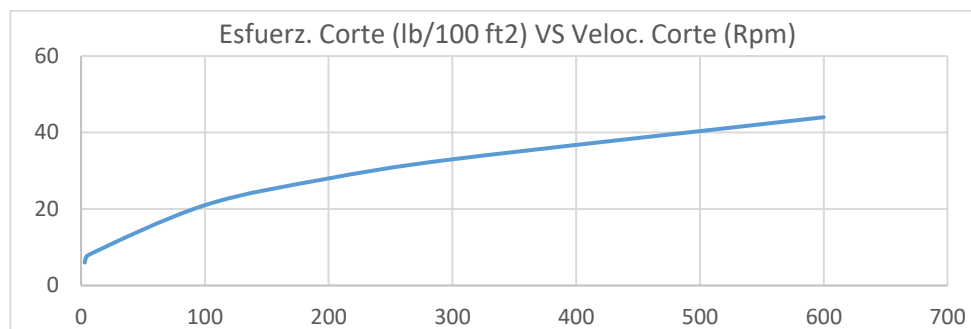


Figura 6. Gráfico de datos tabla 1

Fuente: Autora

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.

El modelo de la ley de potencia (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 perfora un pozo, la velocidad anular es de alrededor de 60 rpm, 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 figura 10, se observa que a bajas velocidades el comportamiento no sigue la linealidad del resto de datos, la gráfica está en dimensiones rectangulares, buscando una línea de tendencia que abarque la mayor cantidad de datos, incluyendo los de baja velocidad de corte, y esto da como resultado una gráfica logarítmica donde no solo la línea pasa 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 describe la fórmula para el modelo de la ley exponencial como:

$$F = K \cdot R^n$$

Donde:

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.  $\left[ \frac{\text{Lbf} \cdot \text{seg}^n}{100 \text{ ft}^2} \right]$

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. El mejor método para disminuir el K es el control y remoción de sólidos mediante métodos mecánicos y químicos.

Por otra parte para hablar del índice n, hay que referirse a un fenómeno que ocurre en los lodos de perforación, donde se presenta una viscosidad elevada a bajas velocidades de corte, fenómeno 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 es menos newtoniano o de una naturaleza no-newtoniana muy fuerte, como valores de  $n$  inferiores a 0,4. Entre más bajo  $n$  el fluido es más viscoso, lo que resulta en un sobreesfuerzo en la bombeabilidad del lodo. La viscosidad plástica debe ser mantenida a valores mínimos para optimizar la hidráulica de la barrena y las velocidades de penetración. Cuando la viscosidad plástica aumenta sin que aumente el peso del lodo, indica generalmente que los sólidos finos se están acumulando en el lodo.

Un fluido muy viscoso, es decir con un valor de  $n$  bajo, en condiciones anulares es un presagio de problemas, la sobrepresión de la bomba puede llegar a causar daños en las formaciones.

El modelo de la ley de potencia modificada (ver figura 11): Tiene en cuenta el esfuerzo de cedencia inicial, para que el fluido tome movilidad. El cambio que se le realizó al modelo fue tener en cuenta la cedencia positiva  $G_0$ .

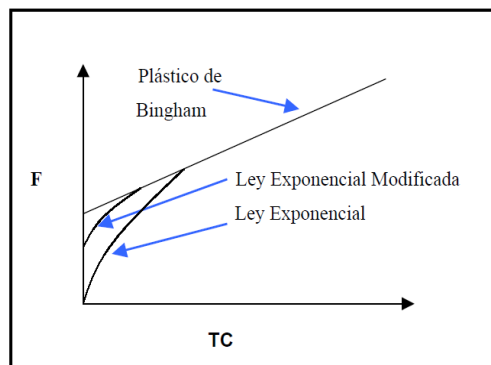


Figura 7. Modelos reológicos – coordenadas rectangulares.  
Fuente Manual IMCO

Para describir el comportamiento del fluido, se tiene la siguiente ecuación:

$$F = K \cdot R^n + G_0$$

Donde  $K$  hace referencia al factor de consistencia del flujo laminar,  $R$  es el esfuerzo cortante aplicado al fluido,  $n$  es el índice de comportamiento de flujo, es decir específica si se tiene un fluido newtoniano o un fluido no newtoniano y  $G_0$  es el valor de cedencia, es decir el esfuerzo mínimo para que empiece a fluir.

Para la determinación de  $G_0$ , se usa del Viscosímetro VG, para el valor a la cedencia positiva de la lectura estable ante un esfuerzo cortante de 3 rpm.

A pesar de que este modelo es un poco complejo, su cálculo se aproxima más al comportamiento real de los fluidos de perforación.

### 3.1.4 Equipos utilizados en la formulación del fluido de perforación.

En la fase preliminar de la investigación se usan los equipos de medición reológica (viscosímetro Fann-35), densidad (balanza de lodos API) y equipos menores, en el laboratorio de fluidos de perforación y completamiento de la Universidad Surcolombiana, para caracterización de los fluidos empleados como fase continua. Posteriormente se continúa la investigación en los laboratorios de Fluidos y Servicios Ltda, donde todos los equipos son del fabricante Ofite Testing Equipment, inc. Se usan en la medición de reología los viscosímetros 800 y HP-HT (alta presión – alta temperatura), filtroprensa HP-HT, horno de envejecimiento (rolado ó Rolling-up), balanza de lodo, equipos de retorta, estabilidad eléctrica y mezclador (mud mixer).

Viscosímetros: 8 velocidades y HP-HT



Figura 12. Viscosímetro de 8 velocidades, termocopa y viscosímetro HP-HT  
Fuente: Ofite Testing Equipment

Viscosímetro de 8 velocidades, permite lecturas a esfuerzos cortantes (rpm) de 600, 300, 200, 100, 60, 30, 6, y 3, ver figura 12, con una precisión en las medidas de 0,1. En el cual, la lectura se realiza sobre el dial de rango de 0 a 300 lb/100ft<sup>2</sup>. Para los lodos base aceite es fundamental la medición de reología a diferentes temperaturas, por esta razón en conjunto con el viscosímetro 800 se usa la termocopa del mismo fabricante, con la que se mantiene el control de temperatura del fluido en análisis.

El Viscosímetro HP-HT, es usado para condiciones extremas de presión y temperatura, la presión se simula con ayuda de un aceite de confinamiento para presionar la muestra y la temperatura con el uso de 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<sup>-1</sup> hasta altas tasas. Este equipo es dirigido por el software ORCADATM, con el cual se puede programar

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

La Filtro prensa HTHP (HTHP Filter Press with threaded cells, 500 mL, drilling fluids), es una filtroprensa a alta presión y alta temperatura, con celda de 500 ml para albergar la muestra de fluido de perforación a una temperatura máxima de 500°F y una presión máxima de 5,000 psi. El área de filtrado requiere el uso de papel filtro de 2.5”.



Figura 13. Filtroprensa HP-HT  
Fuente: Ofite testing equipment

Horno de envejecimiento: En el horno de envejecimiento se localiza la muestra a analizar para someterla a condiciones de presión, temperatura y tiempo de residencia similares a las de fondo de pozo, simulando circulación a través de la rotación de las celdas contenedoras sobre rodillos giratorios. El modelo “5 roller Oven” (ver figura 14), puede almacenar hasta 8 celdas de 500 mL y opera a una temperatura entre 100°F y 500°F, usa cilindros rotacionales que mantienen en movimiento el fluido, a 25 rpm y presión máxima de 2,000 psi.



Figura 14. Horno y celda de envejecimiento  
Fuente: Ofite testing equipment

Balanza de lodo: La balanza de lodos es similar a la descrita anteriormente en el numeral 3.1.2.1., y permite medir la densidad del fluido de perforación por el sistema de balanza de triple brazo. La 4 – scale mud balance (ver figura 15), es una balanza metálica con rangos de medición desde 6,6 – 23 lpg, 49 – 172lb/ft<sup>3</sup>.



Figura 15. Balanza de lodo 4-scale  
Fuente: Ofite testing equipment

Retorta: Es el equipo usado para medir el porcentaje de líquidos y sólidos que tiene la muestra de lodo, a través de evaporación de la muestra depositada en la cápsula que se coloca en la unidad de calentamiento. El fluido evaporado migra hacia el condensador y sale para ser recolectado en una probeta graduada en la cual se mide el contenido de líquidos, en tanto que la fase sólida queda retenida en la cápsula y por gravimetría se determina cuanto del fluido original está conformado por sólidos. La máxima temperatura a la que llega este equipo es de 1000°F, el control de temperatura es electrónico, con una capacidad de 10 mL en su celda interior, ver figura 16.



Figura 16. Retorta  
Fuente: Ofite testing equipment

Estabilidad eléctrica: Medir la estabilidad eléctrica de un fluido de perforación es un indicativo de las cualidades mojantes del fluido, ya sea base aceite o base sintética (Schlumberger, 2003). El ensayo se realiza insertando la sonda de estabilidad eléctrica en un vaso de lodo a 120°F (48,9°C) y pulsando el



botón de prueba. El medidor de estabilidad eléctrica (ES) aplica automáticamente una tensión cada vez mayor (de 0 a 2000 voltios) a través de una separación de los electrodos de la sonda. La tensión máxima que el lodo puede soportar a través del espacio antes de conducir corriente se muestra como la tensión ES. El medidor de ES moderno tiene circuitos de onda sinusoidal, mientras que los medidores más antiguos utilizan circuitos de onda cuadrada, los cuales no deben ser utilizados porque no aplican correctamente la teoría descrita. Referencia citada por Schlumberger, Growcock FB, Ellis CF y Schmidt DD: "Electrical Stability, Emulsion Stability, and Wettability of Invert Oil-Based Muds", *SPE Drilling & Completion* 9, no. 1 (marzo de 1994): 39-46.

Para los ensayos se usa el equipo emulsion stability tester (ver figura 17), 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.



Figura17. Equipo de estabilidad eléctrica  
Fuente: Ofite testing equipment

Mezcladora de lodo (mud mixer): Para la preparación de los fluidos de perforación se requiere de la adecuada mezcla de los aditivos en la fase continua, dándoles el adecuado tiempo de humectación, para lo cual se usó un equipo Hamilton beach mixer (ver figura 18). Este equipo agiliza el tiempo de mezcla por contar con 3 recipientes de mezclado.



Figura 18. Mezcladora de lodo  
Fuente: Ofite testing equipment

### 3.1.5 Formulación de un lodo base aceite convencional

La formulación de un fluido de perforación, hace referencia al diseño de las propiedades químicas y físicas que le permitan acondicionarse a la situación tanto operativa como ambiental de cada perforación.

#### 3.1.5.1 Generalidades

El lodo debe cumplir especificaciones de funcionalidad óptima en cuanto a:

- Sus propiedades (densidad, resistividad, reología, etc.).
- Factores económicos y de disponibilidad de aditivos.
- El impacto del fluido en la producción del yacimiento.
- Cumplimiento de las normas HSE (health, security, environment).

Según Schlumberger (2003) y Chevron (2000), los fluidos de perforación base de aceite son altamente inhibidos, resistentes a contaminaciones, estables a altas temperaturas y presiones, de alta lubricidad y esencialmente no corrosivos. Su principal desventaja son el costo inicial y mantenimiento, además de la dificultad de identificar la zona productora a través de los cortes que de por sí vienen humedecidos en la fase aceitosa del fluido de perforación. En este tipo de fluidos el uso de un agente de control de filtrado es opcional y debe agregarse después del humectante, de acuerdo a los resultados obtenidos durante el proceso de formulación y a los requerimientos de las formaciones perforadas.

El aceite Diesel ha sido usado con mucha frecuencia como base en lodos de perforación, aunque ha habido fluidos en los que se ha usado crudo con los cuales los resultados ambientales han sido cuestionados; por lo que se ha orientado la búsqueda en la formulación de fluidos base aceite, hacia bases con aceites minerales, fluidos sintéticos (de alto costo) y aceites de origen vegetal, con miras a tener un fluido de baja toxicidad, competitivo en costos y en características técnicas.

Para seleccionar el fluido base, debe caracterizarse a través de la gravedad específica, el punto de ignición (flash point), el punto de anilina, el punto de llama (fire point), el punto de neblina (cloud point), el punto de vertido o fluidez (pour point) y la viscosidad, Ryen, (2008).

Estos parámetros inciden en la características final del fluido de perforación de la siguiente manera: la gravedad específica, contribuye significativamente al peso del fluido de perforación y permite el control de la concentración de material densificante; el flash point, como indicador de la volatilidad del aceite, el punto de anilina es un indicador relativo del contenido de aromáticos en el aceite base y por consiguiente determina los requerimientos de viscosificante

y la afectación a los elastómeros presentes en la sarta de perforación. Este indicador del aceite se define como la mínima temperatura a la cual volúmenes iguales de aceite base y anilina ( $C_6H_5NH_2$ ) son miscibles. 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). Es importante tener 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. La arcilla organofílica (viscosificante del lodo) se ve afectada 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.

El punto de llama (fire point), determina las condiciones bajo las cuales se puede presentar un incendio, ya que es la temperatura a la cual el vapor del aceite continúa ardiendo después de haber iniciado la ignición y removido el elemento de chispa. En tanto que el punto de niebla (Cloud point) 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. Por otra parte, el punto de fluidez (pour point) es la temperatura mínima a la cual el fluido es capaz de fluir, 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 los fluidos con alto pour point son indeseables. Y por último, la viscosidad que es la resistencia que tiene el fluido a fluir, comúnmente para el 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 cumplen esta función de manera exitosa. Actualmente se realizan investigaciones para la fabricación de químicos que ayuden a modificar la viscosidad a conveniencia.

### 3.1.5.2 Composición de los fluidos de perforación base aceite

Los fluidos de perforación en general se componen de una fase continua y una fase dispersa. La fase continua está constituida por un fluido que representa el mayor porcentaje del lodo y para el caso de los lodos base aceite podría ser acpm, petróleo, aceites vegetales o sintéticos; en tanto que la fase dispersa la componen diferentes aditivos que permiten alcanzar las propiedades física y químicas requeridas y las emulsiones.

#### 3.1.5.2.1 Base de los aceites

Los componentes de un fluido de perforación base aceite son comúnmente aceites minerales como diesel o kerosene y recientemente algunos aceites vegetales como el de palma, jatropha y ahora de higuera.

Los aceites minerales usados como base o fase continua en los fluidos de perforación, son productos de destilación del petróleo, que van desde el acpm y el kerosene hasta aceites con menos contenido de aromáticos y con menores contenidos de fenantreno (baja concentración de Hidrocarburos Policíclicos aromáticos o polinucleares – PAH), por tanto menos contaminantes. Frecuentemente se usan en fluidos 100% base aceite, con bajas viscosidades a altas tasas de penetración, teniéndose que para el acpm y el kerosene, el punto de inflamación es alto y poseen 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, con una gran desventaja que es el impacto ambiental.

El acpm es usado frecuentemente como fase continua, tiene gravedad API 36-37 grados, lo que le otorga buena fluidez, punto de Inflamación 180 °F (mínimo) asociada a un punto de combustión 200 °F (mínimo), lo que de alguna forma indica que el fluido fabricado a base de acpm representa un riesgo controlable en cuanto a accidentes por incendio; y punto de anilina 140 °F (mínimo), lo que indica que es seguro para los elastómeros, ya que se considera nocivo por debajo de los 120°F. En los lodos base agua se utiliza esporádicamente el acpm para mejorar la lubricidad; sin embargo, no es recomendable usar más del 10% por la formación de emulsiones. El acpm no da suspensión, ni tiene capacidad de neutralizar el agua de formación.

El uso de petróleo en la formulación de los lodos base aceite tiene varios aspectos negativos, además de poseer un punto de inflamación bajo, contiene asfaltenos que pueden cambiar la mojabilidad de la formación y puede causar complicaciones durante la etapa de perforación o completación. El contenido de asfaltenos influye en el rendimiento de los otros productos usados en la preparación de las emulsiones inversas.

El interés ambientalista ha motivado recientemente investigaciones en búsqueda de fluidos de perforación con condiciones más amigables con el medio ambiente, por lo que se han enfocado los esfuerzos a la caracterización del comportamiento de los aceites vegetales como fluidos base; 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 con un resultado toxicológico favorable. Otros aceites que se han utilizado son el aceite de palma, de canola, de semilla de algodón, de sésamo, de soja, y el aceite extraído de la semilla de la higuera.

#### 3.1.5.2.2 Aditivos de los fluidos base aceite

Los aditivos de los fluidos de perforación base aceite son entre otros emulsificantes, humectantes, viscosificantes, densificantes.

Los emulsificantes estabilizan el sistema aceite-agua, pueden ser clasificados como primarios o secundarios, de acuerdo a su función principal como aditivo en el fluido de perforación. Entre los emulsificantes primarios están los jabones de calcio, formados en el lodo por la reacción de la cal y una larga cadena de ácidos grasos ( $C_{16} - C_{22}$ ), como función secundaria actúan como secuestrantes de  $H_2S$  y  $CO_2$ . Un exceso, como cualquier sólido, causa el aumento indeseable en la viscosidad. Los emulsificantes secundarios son agentes humectantes de aceite muy fuertes como las poliamidas, no forman emulsiones como los emulsificantes primarios, pero si forman sólidos humectados por el aceite antes de la emulsión de las fases.

Los humectantes, son generalmente poliamidas, aminas, fosfatos orgánicos, e hidrocarburos sulfonados, entre otros, los cuales se utilizan en los lodos invertidos para mantener humedecidos los sólidos y material densificante, con aceite. Muchos de éstos humectantes actúan como emulsionantes por su favorabilidad a humectar de hidrocarburos los sólidos.

Para mantener el fluido en condiciones de flujo y que a su vez permita el arrastre de sólidos a superficie se usan los viscosificantes, los cuales por lo general poseen valores favorables de viscosidad; sin embargo los viscosificantes usados en fluidos base aceite tienen capacidad suspensiva menor en comparación a los base agua, siendo frecuente el uso de atapulguita y 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, carbonato de propileno y la glicerina, siendo el metanol el más utilizado en los sistemas 100% aceite.

Por otro lado los densificantes, ayudan a controlar las presiones de fondo y prevenir las presiones de surgencia y 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. Adicionalmente el carbonato de calcio usado en diferentes tamaño de grano se comporta como un excelente controlador de pérdida de filtrado.

Los controladores de pérdida de filtrado, es decir los aditivos que minimizan el paso de la fase líquida a la formación por la formación de una cubierta de sólidos de diferente granulometría sobre la pared de la cara del pozo, pueden ser usados preferencialmente a condiciones de temperatura mayores a 300 °F, algunos de los productos utilizados son la gilsonita, el asfalto y el lignito tratado con aminas, además del carbonato de calcio a granulometrías variadas (mallas 150, 200, 400 y 600).

Fabricar un lodo de perforación implica que se haga con la mayor eficiencia técnica, el menor daño ambiental y al menor costo posible. Los costos de los aditivos permiten visualizar el costo general del fluido de perforación considerando la formulación establecida, como se presenta en la Tabla 2, la cual toma los precios unitarios de la empresa Fluidos y Servicios.

Tabla 2. Costos de aditivos en un lodo base aceite tipo.

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	

Fuente: Fluidos y Servicios 2015-2016

El método usado para establecer el daño de formación, consiste en la realización de pruebas de compatibilidad entre fluidos y roca fluido, de tal manera que se describa su comportamiento e interacciones, para determinar la utilización adecuada de aditivos, puesto que ellos pueden afectar tanto las rocas en formación como los cortes que arrastra a superficie y sugerir información errada al personal que estudia e interpreta dicha información.

### 3.1.6 Usos, ventajas y desventajas de los lodos base aceite

Usar lodos de perforación base aceite tiene grandes ventajas operacionales, citadas por Schlumberger, (2013), en el manual de formación denominado Fundamentos de los fluidos de perforación:

- 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. El costo de mantenimiento de los lodos base aceite a altas temperaturas es menor en comparación con los lodos base agua.

- 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, anhídrita 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  $H_2S$  y  $CO_2$  ya que estos gases causan problemas de corrosión y alteran notablemente la reología de los lodos. El control de corrosión es bastante eficiente, esto se debe a que el fluido es no conductor, es térmicamente estable y generalmente no se presenta crecimiento de microbios.
- En extracciones de núcleos o recortes de pared, ya que minimiza el daño que se le puede ocasionar a la herramienta de fondo.
- Prevenir atascamientos de tubería en zona permeables y hoyos desviados.
- Cuando se desee una calibración de mejor calidad, 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, como lo presenta HAWKER y otros, 2001, en el Manual de perforación, procedimientos y operaciones de la empresa Datalog.

- 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.

A pesar de las grandes ventajas y los múltiples usos de los lodos base aceite, ellos presentan algunas condiciones no favorables como son (Datalog, 2001 y Schlumberger 2013):

- El costo inicial de fabricación es alto, especialmente en formulaciones de aceite mineral o sintético. Los costos de operación se tornan muy altos cuando se tiene pérdida de circulación.
- 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. 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.
- La detección de un influjo es más difícil debido a la alta solubilidad del gas en lodo base aceite.
- 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 lodos 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.

### 3.1.7 Aceites vegetales probados en fluidos de perforación

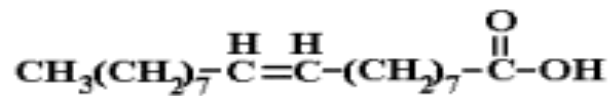
Los procesos investigativos respecto al uso de los aceites vegetales como base en fluidos base aceite se remonta a 1991, como puede observarse en el Anexo A, donde se relacionan las investigaciones más relevantes, dentro de



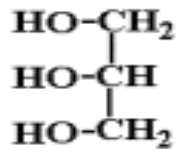
las cuales se destacan los aceites de palma, maní, jatropha, canola, colza, algas, moringa, soya, y obviamente higuera.

### 3.1.7.1 Características y propiedades de los aceites vegetales

Los aceites vegetales se componen en esencia por ésteres de glicerol de ácidos grasos llamados triglicéridos. 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 como se ve en la figura 19, Goering, 1982.



Ácido Oleico



Glicerol o Glicerina

Figura 19. Estructura química del ácido oleico y glicerol

Fuente: Goering 1982

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<sub>2</sub>O) como un subproducto. La concentración, como porcentaje en peso, de aceite del material oleinoso de diferentes aceites vegetales, Kirk, 1994, se observa en la tabla 3.

Tabla 3. 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	Behenico, euricico	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. Encyclopedia 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. En muchos aceites hay metales. El cobre y el hierro tienen importancia por el efecto adverso sobre la calidad del producto. Las características de los aceites vegetales que describen adecuadamente su comportamiento incluye entre otras: punto de fusión, de solidificación, índice de saponificación, de refracción, de yodo, ácidos grasos libres oleicos, peso específico, materia o saponificable y color, las cuales se presentan para varios aceites vegetales en la tabla 4.

Tabla 4. 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 <sup>2</sup>			-	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, fat 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.

El índice de Yodo expresa el grado de instauración de aceites y grasas ó los centigramos de yodo absorbidos por gramo de grasa o aceite; el índice de refracción se usa para probar la pureza de los productos y supervisar las operaciones de hidrogenación e isomerización, aumenta con el peso molecular y tiene una relación que crece de modo aproximadamente lineal con el grado de insaturación de las grasas neutrales. En tanto que el 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.

Los datos de viscosidades cinemáticas (Adawele, 2010; ver figura 21), se exponen a 37.8°C (100,04°F) a excepción de los aceites de almendra y el Diesel, 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.

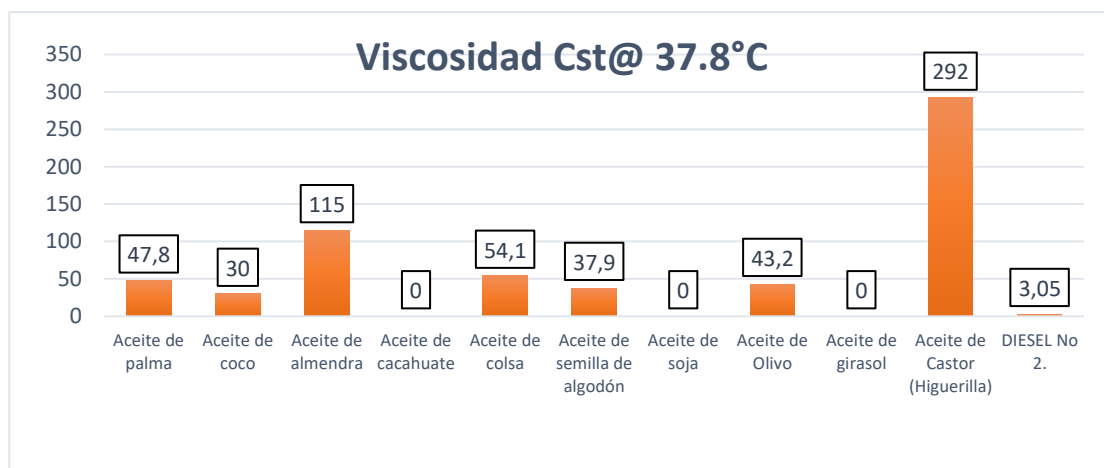


Figura 21. Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel Fuente. Adewale (2010)

Según Adewale (2010), los aceites de castor (higuerilla), coco y diesel tienen viscosidad entre 259 - 325, 29,8 – 31,6 y 2,7 – 3,4 cst, respectivamente.

El aceite de higuerilla presenta la viscosidad más alta, esto es debido a las características del ácido ricinoléico 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 insaturación, es decir a mayor número de doble enlaces, la viscosidad es menor, pero el aceite de higuerilla presenta una cantidad mínima por lo tanto su viscosidad es excesiva. (Alton Bailey, 1995).

### 3.1.7.2 Aceite de higuerilla.

El aceite de ricino obtenido de la semilla de higuerilla, Bailey, 1995, está compuesto de triglicéridos, concretamente por ácido ricinoléico (18:1) con niveles que pueden superar el 90%, y cantidades inferiores de otros ácidos grasos como el linoléico polinsaturado, 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. Como se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Composición del aceite de Higuerilla

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%

Fuente. Alton Bailey, 1995

El aceite de higuerilla 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.

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

En el caso del aceite de higuera, éste tiene el menor “pour point” o punto de fluidez de los aceites mencionados, 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”.

El aceite de higuera 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 higuera que se evaluaron en el laboratorio de bioenergía del INIFAP. Esta información se presenta de forma consolidada en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades del aceite de higuera

Propiedad	Unidades	Estándar ASTM	Resultado	Valor típico
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup> /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

Fuente: Organización Scielo.

La prueba de estabilidad de oxidación del aceite de higuera indica que puede permanecer 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 higuera es alta en comparación con los demás aceites vegetales que comúnmente oscilan entre 27 y 40 mm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Debido a esta propiedad química, el aceite de higuera 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. El índice de acidez del aceite de higuera es menor al 5% lo que representa una ventaja importante.

Según Yassin et al, (1991), las condiciones óptimas para elegir un fluido base para la fabricación de un fluido de perforación base aceite, incluyen un punto de anilina mayor a 65°C, que genere una emulsión estable, lo cual no es aplicable en el presente proyecto pues se trata de la formulación de un fluido 100% base aceite, baja viscosidad cinemática, flash point mayor a 100°F y pour point menor a la temperatura ambiente. Aplicando estos requerimientos al aceite de higuera, se tiene que el aceite de higuera tiene alta viscosidad cinemática. La calificación de estos parámetros se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Resultado evaluación aceite de higuera

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).

Los principales países productores de aceite de higuera en su orden son Estados Unidos, India y Brasil. En Colombia, “la higuera se debe considerar como un cultivo y no como erróneamente es comúnmente catalogado con el concepto de maleza”. El cultivo de higuera 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 inc, 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.

### 3.2 CONSIDERACION AMBIENTALES GENERALES

#### 3.2.1 Antecedentes y regulaciones

Se argumenta que los lodos base aceite (OBM) tienen 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 veracidad; 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 práctica 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.

### 3.2.2 Manejo, minimización y disposición de residuos base aceite

El desarrollo de la normatividad ambiental requiere de tres parámetros fundamentales: Pruebas de toxicidad, Técnicas de minimización de desechos y Tratamiento y opciones de disposición.

#### 3.2.2.1 Las 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 y juveniles de camarones. Este tipo de organismos desempeñan un papel ecológico relevante en el ecosistema marino y en los ambientes lagunares- estuarinos.

Para los ensayos de toxicidad, 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. ( $CL_{50} - xh$ ). En la figura 22, se observan las etapas de crecimiento del camarón.



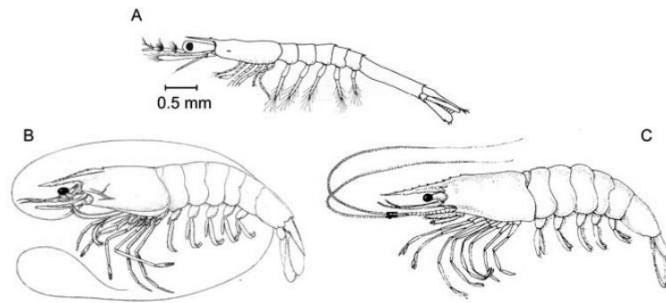


Figura 22. Morfología de *litopenaeus setiferus* y *Litopenaeus vannamei*  
 A). Primera postlarvas de camarones peneidos (esquema producido por Dobkin, 1970), B). Camarones adultos de *Litopenaeus setiferus*, C). Camarones adultos de *litopenaeus vannamei* (esquema)

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

### 3.2.2.2 Técnicas de minimización de desechos

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.

### 3.2.2.3 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.

Históricamente se manejan los siguientes métodos:

En el sitio de separación: hay una deshidratación del material de desecho para un posterior tratamiento del agua a través de plantas industriales especializadas.

Solidificación: se realiza por medio de materiales cementante tales como ceniza de combustible pulverizado, cemento de tipo "Kiln Dust"\*, y cemento Portland\* los cuales son mezclados con los residuos del fluidos y arrojados a una fosa que se tiene como reserva.

Degradación bacteriana: los hidrocarburos son removidos de los desechos de los fluidos de perforación por un tipo de bacteria especial el cual se "come" el hidrocarburo separándolo de los sólidos.

Deshidratación/relleno: el agua que está presente en los residuos depositados en una fosa se puede evaporar o simplemente bombearla hacia afuera después de que los sólidos sean floculados químicamente y luego sedimentados. Después de que se realiza dicho procedimiento se procede a rellenar o tapar la fosa hasta que llegue a superficie.

"Landfarming": una distribución uniforme de lodo y cortes de perforación son mecánicamente mezclados con suelos donde a ciertas condiciones de temperatura, humedad, pH entre otras se presenta una biodegradación de hidrocarburos (carter y faul, 1992).

Lavado: el aceite libre de los cortes es removido mediante el lavado con un solvente o algún tipo de solución especial.

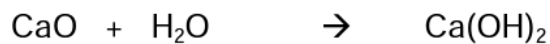
Disposición en vertederos: los lodos y los cortes de perforación son tratados con el fin de eliminar sus contaminantes de acuerdo a ciertas especificaciones legales para luego descargarlos en un vertedero.

Inyección anular: Los cortes de perforación son inyectados a través de un anular hasta el fondo de una formación protegida por casing (Minton et al., 1992)

El instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC) 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: Solidificación, Bioremediación y Desorción Térmica Indirecta

La solidificación: 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 8. % wt de Cal requerida de acuerdo al contenido de aceite.

Contenido de aceite	Cal viva 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

Fuente: Icontec

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

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

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.

La bioremediación es un proceso de degradación de contaminantes por acción de agentes biológicos, estimulado y controlado por el hombre. El proceso utiliza la habilidad metabólica natural de los microorganismos para descomponer compuestos orgánicos hasta CO<sub>2</sub>, agua y biomasa, con la ayuda de nutrientes como fosforo, 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, celdas de tratamiento y áreas de extendido.

Los 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.

Las 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.

Las Áreas de extendido, una vez el porcentaje de TPH (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.

La desorción térmica indirecta, es un 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. El aceite recuperado puede ser reusado, ya sea como fuente de calor, como combustible o en la preparación de fluido nuevo. El material no volátil recorre el cilindro mediante una transportadora de torillo o por gravedad y es descargado por un extremo de cilindro. Estos residuos salen secos casi en un 100 % y listos para su disposición final.

Los lodos residuales, es decir los que no se pueden recircular por cambio de formación, pérdidas de propiedades reológicas o finalización del pozo, pueden generar problemas de contaminación si se realizan malas prácticas, por lo que deben ser almacenados después de su utilización, en recipientes herméticamente cerrados para su posterior tratamiento y re-acondicionamiento.

Una vez se toma la decisión de no reusarlo se procede a la 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 dos normativas, la norma API que habla de un 3% de TPH y 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.

### 3.3 ESPECIES VEGETALES A CONSIDERAR

En cuanto a cobertura geográfica, el petróleo en Colombia, por razones de su origen, se encuentra en las cuencas sedimentarias que se distribuyen en todas las regiones naturales del país, incluyendo las cuencas del Cauca y Patía, inferior del Magdalena, Medio Magdalena, Superior del Magdalena, Valle del Cesar y Ranchería, Putumayo, Orinoco, Amazonas y la Guajira.

En su gran mayoría estas cuencas están en áreas cálidas, por lo que las especies vegetales seleccionadas en el estudio son propias de estas regiones, centrándose en la selección de una especie arbórea nativa *tabebuia rosea* (ocobo), una especie de menor porte usada en linderos *swinglea glutinosa* (limoncillo) y una especie comestible *phaseolus vulgaris*, el frijol.

#### 3.3.1 Especie nativa *tabebuia rosea* (ocobo)

*Tabebuia rosea*, conocida localmente como ocobo, también llamado el árbol de trompeta de color, es un árbol que crece hasta 30 m y pueden alcanzar un diámetro a la altura del pecho de hasta 100 cm, a menudo permanece en zonas muy deforestadas, donde las personas aprecian sus períodos de floración intensa y debido a la semejanza de su madera a la de los robles.



Figura 23. *Tabebuia rosea* (ocobo)

Su corteza es escamosa, copa de forma ovalada, follaje de color verde brillante con hojas compuestas, lisas, opuestas, de forma similar a la palma de una mano, de borde entero, acuminadas (su borde termina en punta) y miden 30 cm de largo por 20 cm de ancho aproximadamente. Flores rosadas tienen forma de campana, con garganta de color amarillo, miden 5 cm de largo y están dispuestas en inflorescencias terminales en forma de cimas. Semillas aladas de color blanco las cuales quedan adheridas al fruto algunos días después de que se abre. Es una especie de crecimiento mediano. Sus raíces son profundas, requiere de suelos húmedos y abundante luz solar (Mahecha et al., 2004).

Mahecha et al.,(2004), indica que la planta de *tabebuia rose*, crece desde el nivel del mar hasta los 1200 msnm. Se adapta a suelos calcáreos, arcillosos y cenagosos. Crece indistintamente en suelos de origen calizo, ígneo o aluvial, se adapta a suelos pobres; tolera la inundación estacional. Se desarrolla en forma óptima con temperaturas entre 20 a 27 °C y zonas con precipitaciones entre 1500 y 1500 mm. Su madera tiene duramen blanco o gris (pardo rosado claro), uniforme. Albura similar al color del duramen. Su peso específico es de 0,5–0,6 g/cm<sup>3</sup>; los vasos son de porosidad difusa; agrupados en grupos radiales cortos (de 2–3 vasos). Tiene estructura estratificada, todos los radios estratificados, parénquima axial estratificado, elementos de vasos estratificados, fibras estratificadas. Dispone los estratos regulares (horizontal o recto), o irregular. Número de estratos por mm axial 3–4. No tiene canales intercelulares. Cristales muy esporádicamente, observados apenas en algunas muestras.

En <https://plus.google.com/collection/ICU9IB> se indica tanto para usos decorativos como domésticos. La madera es utilizada en decoración de interiores de muebles finos, pisos, gabinetes, chapas decorativas,

construcción de botes, ebanistería, ruedas para carretas, artesanías, cajas y embalajes. Es utilizada como ornamental, en parques, jardines y linderos de propiedades. Asimismo es utilizada como planta de sombra de cultivos en las zonas bajas de la región tropical.

La infusión de las hojas se utiliza como febrífugo. La corteza cocida sirve para la diabetes, paludismo, tifoidea y parásitos. Entre los diversos fitoquímicos activos del árbol se encuentra el lapachol, un producto natural compuesto orgánico aislado de otras especies de *Tabebuia*.

### 3.3.2 Especies usadas como linderos. *Swinglea glutinosa* (Limoncillo)

La *swinglea glutinosa* se conoce también como swinglia o limoncillo. La información presentada a continuación sobre esta planta pertenece a: el semillero.net. Es un arbusto vistoso originario de Asia, que inicialmente fue introducido a Colombia por los productores de caña para establecer cercas vivas. El limón swinglea tupe muy cerrado y es bastante espinoso lo que lo hace decorativo y a la vez seguro. Es quizás una de las cercas vivas más populares entre los finqueros en Colombia, donde se distribuye entre 0 y 1200 m. Esta especie es de crecimiento rápido, para lo cual requiere abundante luz solar y riego diario durante los primeros meses después de la siembra.

En realidad la planta no es muy exigente, puede crecer mejor en suelos bien drenados y fértiles, con un pH entre 5 y 7. La especie florece y fructifica dos veces al año, el árbol puede llegar a crecer hasta 15 m<sup>2</sup> y presentar un DAP (diámetro a la altura del pecho) de 40 cm. Para establecer la planta, se sugiere sembrar plántulas de 20 cm. Para lograr una buena densidad en la cerca sugerimos sembrar 6 plántulas por metro lineal y realizar la siembra en triángulo. La poda puede iniciarse al año de edad.

El limoncillo se cultiva entre los 0 y los 1700 msnm, a temperaturas entre 20 y 24°C, con lluvia anual entre 800 y 1200 mm y requiere muchísima luz solar durante el crecimiento, pero no en su primera fase de vida donde requiere protección de las lluvias fuertes, exceso de calor o sol, roedores o pájaros. Es una especie muy rústica para su producción en vivero y el establecimiento de la plantación; las plantas se pueden llevar a terreno en alturas desde incluso 8 cm, producidas en bolsa. Resiste fácilmente la plantación a raíz desnuda con plantas mayores de 10 cm.

Para el establecimiento de las cercas, se plantan 3 ó 4 por metro, a una distancia de 25 o 33 cm entre sí. La altura final de la cerca se puede controlar con la poda; es necesario estimular el brote de ramas antes del transplante a través de poda. La poda se realiza cortando la yema terminal unos 2 a 4 cm,



no es necesario podar las ramas laterales. Una segunda poda se puede hacer cuando las plantas hayan alcanzado en campo 60 cm.

### 3.3.3 Especies comestibles. *Phaseolus vulgaris* (El frijol)

*Phaseolus vulgaris* conocida comúnmente como Frijol. A continuación se presenta la información manejada por IICA (2009) y Fernandez (1986), respecto a las características del frijol, sus condiciones de siembra y crecimiento, además de los cuidados básicos y usos. Es una planta herbácea anual, erecta o trepadora, de tallo pubescente o glabrescente cuando adulta. Las estipulas de las hojas tripinadas son de forma lanceolada y de tamaño medio centímetro. Los folíolos son anchamente ovados u ovado-romboidal, los laterales, implantados oblicuamente, miden 4-15 por 2,5-10 cm y son pubescentes con base redondeada o anchamente cuneada, de bordes enteros y ápice acuminado.

Las flores se disponen en racimos usualmente axilares, más cortos que las hojas. Las bractéolas, persistentes, son habitualmente de longitud igual o algo superior al cáliz que es cupuliforme, bilabiado, de 3-4 mm, con 5 sépalo soldados y con el labio superior bidentado emarginado y el inferior tridentado. La corola, que puede ser blanca, amarilla, violácea o roja, tiene el estandarte centimétrico suborbicular y reflejo, las alas obovadas adheridas a la quilla, también centimétrica y con ápice espiralmente retorcido. Los estambres son diadelfos (9 soldados y 1 libre) mientras que el ovario es pubescente con el estilo espiralmente torcido de 360° o más y con estigma oblicuo. Dicho gineceo deriva en una legumbre lineal-oblonga de unos 10-15 por 1-1,5 cm, algo curvada e hinchada, glabra, picuda y con 4-10 semillas oblongas arriñonadas de muy diversos colores y tamaños, usualmente 1-2 por 0,5-1,5 cm.<sup>12</sup>

El frijol prospera en climas fríos y cálidos, tiene variedades trepadoras y enanas. Se cultiva en suelos no muy salinos, con índice medio de lluvias. Se cultiva en lugares donde el calor del sol llegue al tallo de la planta.

Aunque admite una amplia gama de suelos, los más indicados son los suelos ligeros, de textura silíceo-limosa, con buen drenaje y ricos en materia orgánica. En suelos fuertemente arcillosos, muy calizos y demasiado salinos vegeta deficientemente, siendo muy sensible a los encharcamientos, de forma que un riego excesivo puede ser suficiente para dañar el cultivo, quedando la planta de color pajizo y achaparrada.

Los valores de pH óptimos oscilan entre 6 y 7,5, aunque en suelo enarenado se desarrolla bien con valores de hasta 8,5. Si el suelo es ligero y arenoso, se añade una cantidad abundante de turba húmeda, abono o estiércol maduro.

Si el drenaje no es bueno se forma un cúmulo o montecito y se siembra en su parte superior. Si el suelo es muy ácido se agrega cal.

El frijol es muy susceptible a condiciones climáticas extremas, al exceso o falta de humedad, por tal razón debe sembrarse en suelos de textura ligera y bien drenados. El pH óptimo para sembrar frijol fluctúa entre 6.5 y 7.5. Dentro de estos límites la mayoría de los elementos nutritivos B del suelo presentan su máxima disponibilidad; no obstante, se comporta bien en suelos que tienen un pH entre 4.5 y 5.5. En suelos planos y bien drenados la distancia más conveniente es de 60 centímetros entre hileras y de 10 centímetros entre plantas. La profundidad de siembra apropiada es de 3 a 4 centímetros.

Siembra en camellones:

- 1) En hileras simples, sembrando en el lomo del camellón a una distancia de 60 centímetros entre hileras y de 10 centímetros entre plantas.
- 2) En hileras dobles, éste método consiste en sembrar dos hileras en el camellón, con una separación de 40 centímetros entre hileras y de 60 centímetros entre camellones.

El ciclo vegetativo del frijol varía entre 68 a 80 días, dependiendo de las condiciones ecológicas y la variedad, en promedio normalmente el ciclo dura 75 días.

### 3.4 ESPECIE ACUATICA – *Oreochromis niloticus* (mojarra roja).

La prueba de toxicidad usada en sistemas off-shore se inclina por el uso de postlarvas y juveniles de camarones. Pero en on-shore no se ha establecido una especie, lo cual permite la selección de una que cumpla con características de ciclos de vida acorde al camarón por lo que se selecciona realizar el ensayo 96LC50 con alevines de *Oreochromis niloticus* (mojarra roja), además porque es de gran interés económico en la región del Huila.

La descripción tanto de la especie como de la forma de cultivo se fundamenta en la información presentada por Linnaeus, (1758) en el documento de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y por Toledo (2000), además de las recomendaciones técnicas del Ing Jairo Rodríguez, reconocido cultivador de tilapia roja en Neiva.

La tilapia es un pez teleósteo, del orden Perciforme perteneciente a la familia *cichlidae* originario de África, habita la mayor parte en las regiones tropicales del mundo, donde las condiciones son favorables para su reproducción y crecimiento. Es un pez de buen sabor y rápido crecimiento, se puede cultivar

en estanques y en jaulas, soporta altas densidades, resiste condiciones ambientales adversas y tolera bajas concentraciones de oxígeno.

Actualmente se cultivan con éxito unas diez especies. Como grupo, las tilapias representan uno de los peces más ampliamente producidos en el mundo. Las especies más cultivadas son *O.Aureus*, *O.Niloticus* y *O.Mossambicus*, así como varios híbridos de estas especies. Son especies aptas para el cultivo en zonas tropicales y subtropicales. Debido a su naturaleza híbrida, se adapta con gran facilidad a ambientes lénticos (aguas poco estancadas), estanques, lagunas, reservorios y en general a medios confinados

El término Alevín (ver Figura 24), es utilizado comúnmente para denominar a las crías recién nacidas de peces. Más precisamente, este término hace alusión al momento en el cual las crías rompen el huevo y comienzan a alimentarse, es decir una vez las larvas han reabsorbido su vesícula vitelina, nadan libremente y reciben el alimento sin ninguna dificultad. La etapa de alevinaje finaliza una vez alcanzan una talla aproximada de 8 cm, momento en el cual se llaman dedinos o juveniles y se comienza con la etapa de engorde. La fase de alevinaje es uno de los períodos más críticos, donde se deben tener muchos cuidados en el manejo, ya que de esto depende el éxito o fracaso de un criadero.



Figura 24. Alevín.

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos102/alevines-trucha/alevines-trucha.shtml#ixzz3xi8s9LXF>

Es necesario que en las primeras semanas de vida de los alevines no haya corrientes ya que pueden ser arrastrados, si se quiere se puede incluir una ligera aireación, sin producir corrientes. Transcurridas unas semanas, se puede introducir un sistema de filtrado ligero que no arrastre a los alevines e introducir un sistema de aireación para que rompa la superficie y los alevines puedan respirar y desarrollar el sistema de respiración, en este periodo (a las 3 - 4 semanas) es cuando los alevines desarrollan el sistema laberíntico (sistema que les permite respirar).

La mejor alimentación que se les puede suministrar a los alevines es alimento vivo, aunque también se les puede mantener con alimento seco en polvo. La alimentación depende del tamaño que tengan los alevines, por ejemplo alimentos como infusorios y artemia es lo más usado para alevines pequeños, mientras que la lombriz roja y lombrices de tierra son los alimentos más proporcionados a los alevines cuando estos alcanzan un mayor tamaño. Los alevines necesitan alimentarse varias veces al día en pequeñas cantidades.

En los primeros días se alimentan de pequeños microorganismos que facilitan las plantas naturales. En la segunda y tercera semana de vida los alevines desarrollan el sistema respiratorio, por lo que se hace importante mantener durante este tiempo el tanque de cría tapado para evitar los contrastes de aire. A partir de la tercera o cuarta semana de vida, los alevines empezarán a mostrar algunos de sus colores, los colores claros irán apareciendo después.

Las características del agua, presentadas en el manual de crianza de la tilapia de Nicovita, sugiere mantener los parámetros fisicoquímicos en las condiciones presentadas en la tabla 9:

Tabla 9: Rangos óptimos de parámetros fisicoquímicos para la tilapia.

PARÁMETRO	RANGOS ÓPTIMOS
Oxígeno	> 4 mg/L
Temperatura	28 °C – 32 °C
Dureza	50 – 350 ppm
Alcalinidad	100 – 200 ppm
pH	6.5 - 9
Amonio	< 2 ppm
Nitritos	< 0.1 ppm
Dióxido de carbono	< 20 ppm
Sulfuro de hidrógeno	< 10 ppm
Ácido cianhídrico	< 10 ppm
Gas metano	< 25 ppm
Sólidos en suspensión	< 100 mg/L
Fosfatos	0.6 ppm – 1.5 ppm
Cloruros	< 10 ppm
Sulfatos	< 18 ppm

Fuente: Nicovita - manual de crianza de tilapia

Oxígeno: Dentro de los parámetros físico-químicos, es el más importante en el cultivo de especies acuáticas. El grado de saturación del oxígeno disuelto es inversamente proporcional a la altitud y directamente proporcional a la temperatura y pH. Los valores de oxígeno disuelto debería estar por encima de los 4mg/L. Valores menores al indicado reducen el crecimiento e incrementa la mortalidad.

Temperatura: El rango óptimo de temperatura para el cultivo de tilapias fluctúa entre 28°C y 32°C, aunque ésta puede continuarse con una variación de hasta 5°C por debajo de este rango óptimo.

Dureza: Es la medida de la concentración de los iones de Ca y Mg expresadas en ppm de su equivalente a Carbonato de calcio. Los rangos óptimos se encuentran entre 50-350 ppm de CaCO<sub>3</sub>, por otra parte por estar relacionada directamente con la dureza, el agua para el cultivo debe tener una alcalinidad entre 100ppm a 200ppm.

pH: El rango óptimo está entre 6.5 a 9.0, si se tienen valores por encima o por debajo se generan cambios de comportamiento en los peces como letargia, inapetencia, retardo en el crecimiento y retrasan la reproducción.

Amonio: Es un producto de la excreción, orina de los peces y descomposición de la materia. Cuando los valores de pH son bajos (ácidos), el amonio no causa mortalidades. Los valores de amonio deben fluctuar entre 0.01 ppm a 0.1 ppm, los niveles de tolerancia para la tilapia se encuentra en el rango de 0.6 a 2.0 p pm.

Nitritos: Se generan en el proceso de transformación del amoníaco a nitratos. Es necesario mantener la concentración por debajo de 0.1 ppm, haciendo recambios fuertes, limitando la alimentación y evitando concentraciones altas de amonio en el agua.

Dióxido de carbono: Debe mantenerse en un nivel inferior a 20 ppm, porque cuando sobrepasa este valor se presenta letargia e inapetencia.

Gases tóxicos: Son compuestos químicos producidos en los estanques por la degradación de materia orgánica. Los más comúnmente hallados y las concentraciones máximas a las que deben estar son: Sulfuro de hidrógeno menos de 10 ppm, ácido cianhídrico menos de 10 ppm y gas metano menos de 25ppm.

Sólidos en suspensión: Aumentan la turbidez en el agua, disminuyendo el oxígeno disuelto en ella. De acuerdo a la concentración de sólidos disueltos podemos clasificar los estanques así:

Estanques limpios: Sólidos menores a 25 mg/l.

Estanques intermedios: Sólidos entre 25 - 100 mg/l.

Estanques lodosos: Sólidos mayores a 100 mg/l.

Fosfatos: Son productos resultantes de la actividad biológica de los peces y de la sobrealimentación con alimentos balanceados. Su valor debe fluctuar entre 0.6 y 1.5 ppm. Su toxicidad aumenta a valores de pH bajos (ácidos).

Cloruros y sulfatos: Al igual que los fosfatos, se derivan de la actividad metabólica de los peces y del aporte de los suelos y aguas subterráneas, utilizadas en las granjas piscícolas. El límite superior para cada uno de estos compuestos, son 10 ppm y 18 ppm respectivamente.<sup>13</sup>

### 3.5 SUELOS E HIDROCARBUROS (TPH)

#### 3.5.1 Características de los suelos

Se considera como suelo a la delgada capa que se encuentra sobre la corteza terrestre, compuesto por un material proveniente de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que habitan sobre éste. Cuando es una alteración física el suelo mantiene su composición mineralógica, mientras que si es una alteración química la constitución mineralógica es diferente a la que poseía la roca madre (Crespo, 2004).

Según Ansorena (1994), en su publicación en la revista *Sustrai*, dice que el suelo se compone de tres fases: *sólida*, *líquida* y *gaseosa*, cuya composición y proporciones dependen de la naturaleza del suelo y de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.). La fase sólida contiene los componentes mineralógicos y la materia orgánica (residuos de organismos animales y vegetales) y se genera debido a la degradación o meteorización de la roca madre mediante acción de agentes climáticos. La materia orgánica en los suelos es una gran fuente de carbono y su descomposición se debe a microorganismos que obtienen su energía de la materia orgánica dejando como residuo final un *humus* el cual aporta beneficios nutricionales a los suelos. Por otra parte la fase líquida es en realidad una solución acuosa de gases y sólidos disueltos que se encuentran retenidos en los poros debido al efecto capilar, tal cual es el proceso que ocurre en un tubo capilar que simula ser un material poroso. Finalmente la fase gaseosa no es sino aireación de las plantas en el suelo y dependerá de la cantidad de agua presente en el suelo. A menor cantidad de agua en el suelo, la aireación será máxima, y a medida que se humedezca el suelo, disminuirá la cantidad de aire.

La matriz de un suelo consta de cinco componentes principales:

- 1) Minerales: Los materiales minerales constituyen los principales componentes estructurales de los suelos y suponen más del 50% del volumen total.
- 2) Aire – agua: Conjuntamente constituyen el volumen de poros, que, por lo general, ocupa entre el 25 y 50% del volumen total. La proporción aire – agua varía considerablemente con la humedad del suelo.
- 3) Organismos vivos: Ocupan menos del 1% del volumen.
- 4) Materia orgánica: Oscilan entre el 3 y 6% del volumen, con valor medio.

El mineral predominante en un suelo es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Igualmente se encuentran en abundancia el aluminio y el hierro, mientras que el calcio, magnesio, potasio, titanio, manganeso, nitrógeno, azufre, sodio y fósforo están presentes en menor cuantía (Alexander, 1991). La composición química varía de un suelo a otro y, en un mismo suelo, a diferentes profundidades. Los microorganismos obtienen parte de los nutrientes que necesitan de la fracción mineral del suelo, siendo dichos nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, azufre, hierro, calcio, manganeso, zinc, cobre y molibdeno. Sin embargo los microorganismos pueden disponer con facilidad únicamente de una pequeña parte de estos minerales, convirtiéndolos más en una provisión de lento empleo, que en una fuente de rápido uso.

Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas, teniendo en cuenta tres componentes principales: Arcilla, pasa por un tamiz de 0,002 mm ( $2\mu\text{m}$ ), Limo, queda retenido en el tamiz de 0,002 mm pero pasa a través del tamiz de 0,05 mm y Arena, queda retenida en el tamiz de 0,05mm aunque pasa a través del de 2mm.

El área específica (área/volumen) de los diferentes tipos de partículas afecta directamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La arcilla constituye el tipo de partícula que mayor efecto produce sobre las propiedades de un suelo, principalmente debido a la alta actividad superficial que la caracteriza. La mayor parte de sus partículas son de naturaleza coloidal, tienen una carga superficial negativa y de forma plana; además, son buenos absorbentes de agua, iones y gases. Las partículas de mayor tamaño, como la arena, no tienen el mismo nivel de actividad superficial. Los principales efectos asociados a las partículas de arena están relacionados con el tamaño del poro del suelo y, por tanto, con el movimiento del aire y el agua a través del mismo (las arenas no afectan en gran medida a las propiedades químicas y biológicas del suelo).

La presencia en un suelo de superficies que absorban con gran intensidad determinadas clases de compuestos puede reducir la disponibilidad de

compuestos orgánicos para la biodegradabilidad. También afecta la disponibilidad de nutrientes la capacidad de intercambio de cationes en el suelo de los minerales arcillosos y los compuestos orgánicos que constan de zonas con carga eléctrica superficial negativa. El amonio, por ejemplo, que tiene carga positiva, pasa a estar disponible en menor grado para su uso directo por plantas y microorganismos y queda retenido en el suelo más tiempo que los nitratos, oxidándose y pasando a tener carga negativa.

### 3.5.2 Características del humus de lombriz californiana

Según Stevenson (1994), el humus es la materia orgánica transformada y estabilizada que se acumula en el suelo y en los sedimentos acuáticos y que constituye la fracción orgánica más abundante de la biosfera. Es un regenerador de suelos y abono 100% natural, que se obtiene de la transformación de materia orgánica compostada, por medio de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia foetida*). La lombriz tiene la capacidad de asimilar elevadas concentraciones de algunos compuestos protóxicos y metales (Cu, Fe, Cd, Pb, Zn), disminuyendo la concentración de éstos en los suelos (Cova et al, 2007). Este producto tiene unas propiedades específicas que lo convierten en un complemento extraordinario para mejorar los suelos de cultivo de cualquier vegetal. La primera y más importante, es su riqueza en Microorganismos (flora microbiana: 1gr. de Humus contiene aproximadamente 2 billones de microorganismos vivos), que al ponerse en contacto con el suelo, aumentan la capacidad biológica de éste y como consecuencia su capacidad de producción vegetal. De acuerdo a experiencias anteriores (Sánchez et al.2004), los suelos contaminados con petróleo crudo pueden limpiarse mediante la acción de bacterias autóctonas presentes en agentes bioestimulantes para mejorar la calidad de los suelos.

Según Acevedo (2011), el humus de lombriz es, en realidad, las deyecciones de un anélido invertebrado, de los que se conocen muchas especies pero que solo dos o tres se han adaptado a las prácticas de lombricultura. En concreto la "Eiseniafoetida" o lombriz roja de California, es la más utilizada, que aunque es originaria del Cáucaso, se la conoce por este nombre gracias a Thomas Barret, un californiano que empezó su cultivo en los años veinte de forma experimental. Estas deyecciones son un verdadero milagro para la tierra. Millones de colonias de microorganismos beneficiosos por gramo hacen del humus de lombriz un material extraordinario para afianzar y devolver la vida a los suelos. Aunque las proporciones de nutrientes no son muy elevadas, sin embargo su ph neutro, buenas cantidades de ácidos húmicos y fúlvicos, su enorme capacidad de intercambio catiónico (CIC 150 a 300 meq/100 gr.) de



ahí su gran capacidad de retener nutrientes y agua (hasta 1500 cc. /kg.), convierten al humus de lombriz como en un extraordinario fertilizante natural.

Los beneficios de usar el humus de lombriz californiana se expresa a nivel físico, químico y biológico. A nivel físico mejora la aireación y capacidad de retención de agua y nutrientes, mejora la capacidad de germinación de las semillas., reduce la erosión del suelo y mejora el manejo del suelo. A nivel químico enriquece el suelo de sustancias orgánicas y minerales esenciales, promueve la asimilación de los nutrientes transformándolos en formas asimilables y conserva y eleva el contenido orgánico de los suelos. Finalmente a nivel biológico incorporado en el trasplante, reduce el "shock" postransplante, favorece la formación de micorrizas, aumenta la flora microbiana beneficiosa y aumenta la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades (Información brindada por Agropecuaria Canamar).

La estructura del humus está formada por diferentes macromoléculas complejas que son muy resistentes a la biodegradación. Por esta razón, el humus es considerado como un material recalcitrante, lo cual se ve reflejado en la vida media de sus componentes que puede llegar a ser mayor a 500 años (Stevenson, 1994). A pesar de su sobresaliente estabilidad en el ambiente, muchos estudios recientes han indicado que el humus puede jugar un papel importante en la transformación de compuestos orgánicos e inorgánicos en ambientes anaerobios, como el suelo y los sedimentos de acuíferos. Los estudios iniciales revelaron que las quinonas, estructuras muy abundantes en el humus, son las responsables de las propiedades catalíticas del humus que pueden facilitar múltiples reacciones (Field et al., 2000; Scott et al., 1998). Los ácidos húmicos constituyen la fracción del humus que contiene una mayor concentración de quinonas (Stevenson, 1994). Por esta razón, los ácidos húmicos han mostrado un mayor impacto catalítico, comparado con las otras fracciones del humus (humina y ácidos fúlvicos), en la conversión de diferentes contaminantes (Field et al., 2000).

Los principales elementos que se encuentran en el humus son: Ácidos Húmicos, Ácidos Fúlvicos, Nitrógeno, Fósforo, Carbono y Potasio.

### 2.5.3 Influencia del humus en biorremediación de hidrocarburos

En el suelo, los hidrocarburos pueden llegar a representar un riesgo para el aire, las aguas subterráneas, la calidad del suelo, la flora y la fauna (Schaefer & Filser, 2007). La biorremediación permite la recuperación de suelos contaminados, mediante el empleo de microorganismos autóctonos, los cuales

llevan a cabo la degradación del hidrocarburo, empleándolo como fuente de energía en procesos oxidativos y reductivos bajo ciertas condiciones especiales (Álvarez & Guevara, 2003). Debido a la variada composición que presentan los hidrocarburos lo hace un sustrato ideal para medir el potencial degradativo que tiene el humus en procesos de biorremediación de hidrocarburos (Canals, 2005).

Los suelos contaminados de hidrocarburos contienen mayor cantidad de microorganismos con respecto a suelos no contaminados, pero la diversidad microbiana es menor, por esta razón se decide emplear productos y técnicas que permitan estimular el crecimiento bacteriano para llevar a cabo procesos de biodegradación de los componentes de los hidrocarburos (Gallego et al, 2004).

El humus al ser utilizado en suelos contaminados actúa como un agente bioestimulador, Gómez (2008), ya que provee una fuente de nutrientes para aumentar la cantidad de bacterias nativas del suelo contaminado, además mejora el intercambio catiónico y puede actuar como aceptor final de electrones en procesos de respiración microbiana (función necesaria para la degradación anaerobia de contaminantes). Todas estas razones hacen del humus un agente biodegradable ideal para reducir los niveles de contaminación que se puede llegar a presentar por parte de los hidrocarburos.

### 3.6 DETERMINACION DE LOS COSTOS AMBIENTALES – METODO DE MINIMOS CUADRADOS ORDINALES

La evaluación de costos ambientales se centra en la determinación del valor económico del medio ambiente, siendo este la sumatoria de los valores presentes descontados de todos los flujos de bienes y servicios ofrecidos a la sociedad, considerando que en ciertas condiciones el descuento puede ser al infinito, Pearce et al., 1995. Se tienen flujos de bienes y servicios directos e indirectos que pueden ser consumidos en el presente o en el futuro por una generación; y por otras generaciones.

#### 3.6.1 Modelo de asignación de costo

La asignación sobre el valor económico de los distintos bienes es la que rige las decisiones de los distintos agentes y conduce a asignaciones eficientes. Esta asignación eficiente no se cumple en el caso de los bienes ambientales, principalmente por que los bienes generan externalidades, tienen la característica de un bien público y su uso mantiene muchas interrogantes. Los bienes ambientales no tienen mercado y por lo tanto se encuentran fuera del mecanismo de los precios, Azqueta, 2002.

La economía medio ambiental tiene como objetivo la búsqueda de un sistema que logre armonizar la naturaleza con la satisfacción de la necesidad de la población, Pearce y Turner (1995). El ser humano de forma individual y la sociedad en su conjunto, ha buscado dar respuesta a sus necesidades desde las básicas a las de placer, para lograrlo ha echado mano de forma despreocupada de los recursos de la naturaleza. El avance en los conocimientos de los efectos producidos por la acción humana, no se ha visto manifestado en el modelo económico de mercado, lo que deja sin protección y/o compensación a situaciones particulares como la degradación de la biosfera, la destrucción y agotamiento de los recursos naturales.

En la búsqueda de organizar estos atributos, Boyle define cuatro tipos distintos de valor en los bienes ambientales. El primero sería aquel cuyo uso implica consumo, como la pesca o la caza. Un segundo valor sería, aquellos cuyo uso no implica consumo, como el sentimiento de tranquilidad que brinda el constante ruido de las olas de mar. El tercero sería el uso indirecto que proporcionan algunos servicios, como los documentales. Y por último el valor de existencia, presente en personas que valoran positivamente que un bien exista, aunque no lo utilizan directa ni indirectamente, y no piensan que lo podrán usar en el futuro. Este es el caso de un valor simbólico que puede tener un bien ambiental, dentro de una comunidad.

El valor económico ambiental total, según Freeman 2004, se da en dos sentidos el valor de uso y el valor de no uso. Si se evalúa el valor de uso debe considerarse el valor de uso directo, indirecto y de opción, es decir el valor a futuro; en tanto que para la valoración de no uso, esta debe manejar el valor para otros, como el altruismo y legado, y el valor de existencia. En conclusión, el valor económico ambiental total es la sumatoria de estos valores citados.

$$VEAT=VU+VNU=(VUD+VUI+VO)+(VA+VL+VE)$$

Donde:

VEAT = Valor económico ambiental total

VU = Valor de uso

VNU = Valor de no uso

VUD = Valor de uso directo. Beneficio obtenido por el uso de bienes consumibles como agua o madera o no consumibles como recreación o disfrute del paisaje.

VUI = Valor de uso indirecto. Que hace referencia al valor de beneficios funcionales en un ecosistema, como la cobertura vegetal en la protección de cuencas

VO = Valor de opción. Que se orienta a los valores futuros como nuevos avances tecnológicos.

- VA = Valor de altruismo. Es inherente a la tendencia a procurar el bien de las personas de manera desinteresada, incluso a costa del interés propio, ya sea hacia la naturaleza o la generación presente.
- VL = Valor de legado. El cual en esencia es similar al altruismo solo que orientado a generaciones futuras.
- VE = Valor de existencia. Simpatía, benevolencia.

Según Boyle 1985, si la actividad económica genera impactos ambientales, estos deben verse reflejados en el universo mercantil, esto es, valorar aquellos elementos y funciones medioambientales que no tienen mercado. Azqueta (2002), menciona dos grandes grupos donde se concentran las diferentes formas de valor, uno de estos grupos es el valor de uso y el otro el valor de no uso. El valor de uso es considerado como elemental, ya que este hace referencia a la actuación directa que tiene el bien ambiental sobre acciones de personas o de un colectivo. Esta relación con el bien ambiental se verá afectada si experimenta un cambio o alteración con respecto a la calidad, existencia o accesibilidad del mismo. Se pueden presentar casos en que no se consume como tal el uso del bien, y que su disfrute sea de forma subjetiva; este es el caso del disfrute que ofrece la lectura de un libro. A estos casos se les suele denominar, uso no consuntivo, uso delegado o uso vicario del bien. Asimismo, se establecen los bienes de uso directo e indirecto, ambos relacionados con la forma de generar utilidad.

Se considera al valor de opción como un subconjunto de uso futuro del grupo de valor de uso. El valor de opción se define como el valor que tiene la posibilidad de un futuro uso de un bien. Pearce y Turner (1995) la primera parte de la ecuación del denominado valor económico total es resultado del valor de uso. Valor de uso = Valor de uso actual + Valor de opción. El valor económico total será el resultado de la taxonomía de los valores económicos en función de su relación con el medio ambiente. El valor de no uso forma parte de los atributos del medio ambiente. En contraparte del valor de uso, el valor de no uso se define como un valor no relacionado con ningún uso, ni de forma consuntiva o no consuntiva, ni actual ni potencial del bien ambiental. El valor elemental de este conjunto es el denominado valor de existencia. Este valor implica que un grupo de personas disfrutan o se sienten compensados con saber que otras personas pueden hacer uso y disfrute de un bien ambiental. Esto supone que estas personas no tienen interés en el presente ni en el futuro de hacer uso de este bien. Pero no por ello, pierde importancia para el grupo, por el contrario, cualquier alteración al medio, supondrá una pérdida de bienestar.

Según Azqueta (2002) los motivos que justifican el valor de existencia son:

- La benevolencia: la estima que despiertan amigos y parientes, y que lleva a desear su mayor bienestar.

- La simpatía para con la gente afectada por el deterioro de un bien ambiental, aun cuando no tengamos ninguna relación directa con ellos.
- El motivo de herencia o de legado. Sería el deseo de preservar un determinado bien ambiental para disfrute por parte de las generaciones futuras.
- El valor simbólico que puede llegar a tener un determinado bien ambiental o recurso natural, como parte de la identidad de un colectivo.

### 3.6.2 Valoración ambiental

De acuerdo a Pearce y Turner (1995), la forma de otorgar el valor, aunado a la falta de mercado del ámbito medio ambiental, conlleva a crear un mercado artificial mediante la estimación de las preferencias de la gente, estas preferencias se ven valoradas en la disposición a pagar por el disfrute de un bien ambiental o por la disposición a recibir una compensación por la pérdida del mismo. La literatura ambiental ha identificado tres relaciones básicas de valores que parecen estar en la base de la política y la ética adoptada en la sociedad: valores expresados a través de preferencias individuales; el valor de preferencia pública que encuentra su expresión en las normas sociales y el valor funcional físico del ecosistema.

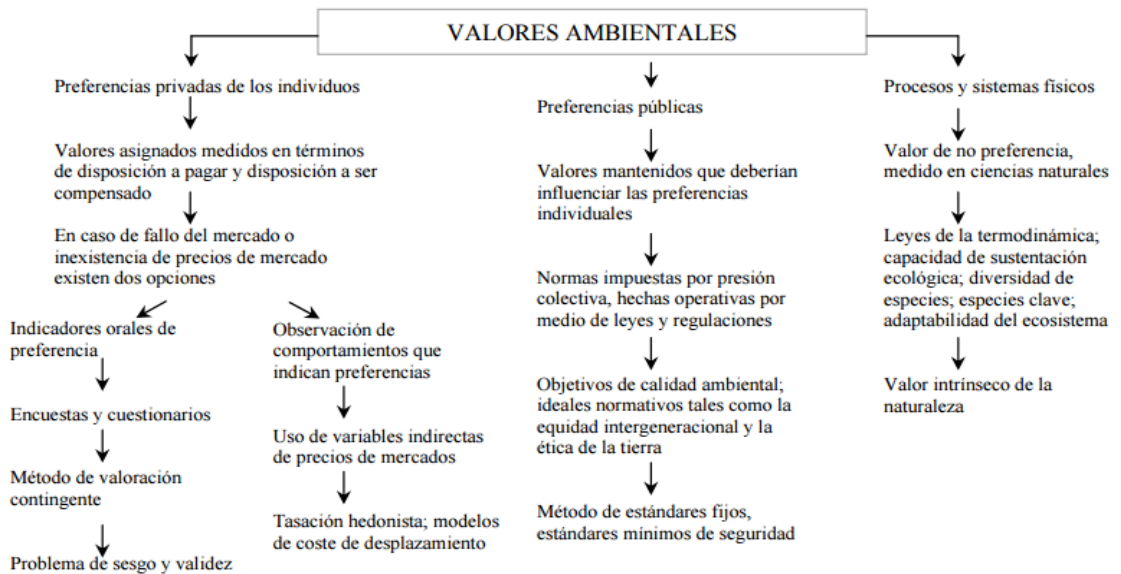


Figura 25. Relación entre los distintos tipos de valores ambientales

Fuente: Pearce y Turner, 1995.

La justificación de la valoración monetaria del medio ambiente reside en que el dinero es un patrón de medida para indicar las pérdidas o ganancias de utilidad o bienestar.

La razón del uso de dinero como medida, es que todos expresamos nuestras preferencias día a día en esos términos: al comprar bienes indicamos nuestra “disposición a pagar” intercambiando dinero por bienes y/o servicios; a cambio de ello, nuestra disposición a pagar debe reflejar nuestras preferencias. Estas preferencias que refleja el mercado vienen acompañadas por unas situaciones que resalta Anderson (1993):

- La información es personal y egoísta: la persona revela lo que el bien o servicio en cuestión representa en su función individual de bienestar.
- No se enjuicia sobre el papel de satisfacción del bien o servicio. Solo es relevante lo que se está dispuesto a pagar por él.
- El mercado selecciona información proveniente de una demanda solvente, desechando aquello que considera con falta de valor.
- Se plantea el intercambio del objeto valorado por una cantidad de dinero.

Las técnicas de medición de los daños o beneficios que se infligen al medio ambiente, deben estar en el marco del sistema económico, con lo que se busca orientar los modelos económicos a una alternativa que incluya el ámbito medio ambiental. Esta situación afronta a una sociedad basada en un sistema capitalista, el cual utiliza el mercado como medio de información sobre el valor de bienes y servicios.

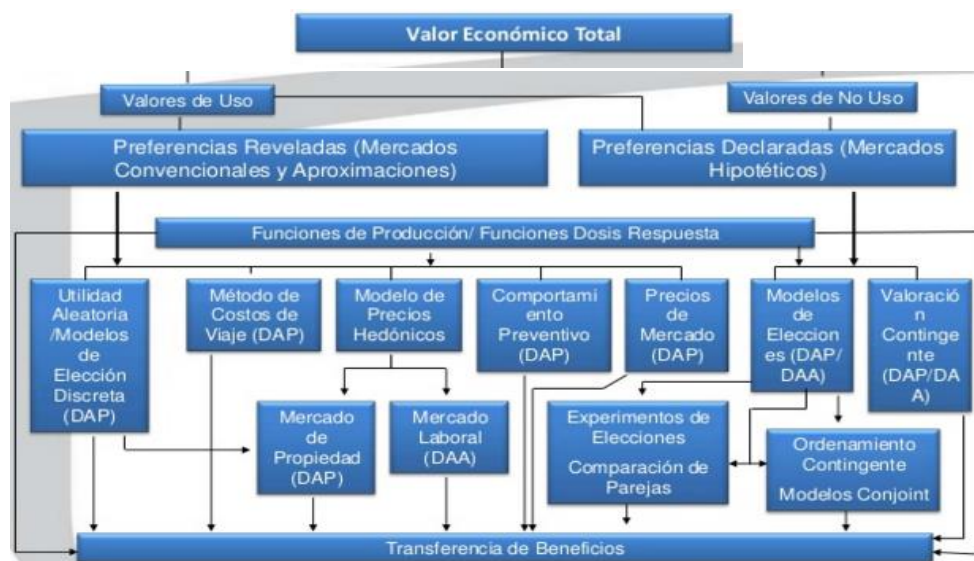


Figura 26. Valor económico total  
Fuente: Bateman 2002

Los métodos más relacionados con las preferencias privadas de los individuos, dado que son los utilizados con mayor frecuencia, son: el método de los

precios hedónicos, el método de valoración contingente y el método de costo de viaje. El método de los precios hedónicos busca darle un valor cuantificable a los bienes o servicios ambientales en función del impacto que ellos causan o en lo que se está dispuesto a pagar o dispuesto a aceptar, en tanto que el método de valoración contingente se establece a través de encuestas directas y por último el método de costo de viaje, muy enfocado a la recreación, que permite identificar el valor respecto a expectativas y a lo que está dispuesto el consumidor a pagar y a aceptar por un bien o servicio específico.

Esta es la función de los métodos indirectos y en ella se establece mecanismos que permiten establecer estimaciones monetarias sobre bienes que carecen de mercado, como los servicios y los bienes medio ambientales.

Para Azqueta (2002), esta relación puede ser de dos tipos:

- Relaciones de complementariedad, que se establece cuando el disfrute de los bienes ambientales o de sus servicios, requiere o se ve potenciado por el consumo de los bienes privados.
- Relaciones de sustituibilidad, que aparece cuando los bienes ambientales entran en función de producción de bienes y servicios, o de utilidad, junto con otros insumos que pueden ser adquiridos en el mercado, y que pueden reemplazarlos en estas funciones.

En la literatura medio ambiental se puede destacar la descripción de los métodos indirectos que Freeman (1992) ofrece, “los métodos de observación indirecta simulan, en cierta forma, el trabajo de un detective que trata de componer las pistas que van dejando los individuos acerca de las valoraciones de los precios medio ambientales a medida que responden a los precios y otras señales económicas en sus elecciones reales”.

Existe una gran variedad de Métodos Indirectos, entre los que destacan por su popularidad el Método de los Precios Hedónicos. Este método es utilizado cuando el bien o muchas de sus funciones a evaluar no tienen mercado, en consecuencia se desconocen los efectos que se producen en el mismo. En algunos casos se establece que el método se basa en el supuesto de una relación causal. Este caso está presente donde la valoración ambiental tiene una relación directa con el valor de un bien, y esto se ve reflejado en una mayor o menor demanda del mismo.

La característica principal del método consiste en buscar los atributos del bien que explican su precio y discriminar la valoración ponderada que se les otorga a cada uno de ellos. En otras palabras, se busca aislar del conjunto cada característica del bien y adjudicarle su precio implícito. Para lograrlo, primero se identifican las variables que pueden determinar el valor de un bien y

agregarle la variable ambiental. Establecida esta relación, se busca determinar el deseo marginal de pagar o ser compensado por un cambio medio ambiental.

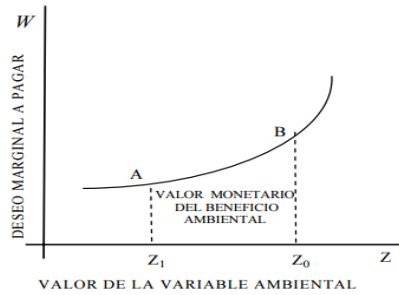


Figura 27. Valoración de la variable ambiental  
Fuente: Freeman (1992)

Una vez conocida la función  $W = W(Z)$  se determina el valor monetario de una alteración ambiental, donde la reducción de un mal ambiental  $Z_0$  a  $Z_1$ , genera un valor monetario que se contempla en el área  $Z_0ABZ_1$ . En otras palabras, el valor monetario de los beneficios ambientales se ve reflejado en la función:

$$\int_{Z_1}^{Z_0} W(Z) \cdot dZ$$

Para llegar a este punto se hace necesaria la identificación de indicadores ambientales y a su vez asignar la valoración del costo ambiental, para posteriormente aplicar un método matemático que para el objeto de esta investigación es el método de mínimos cuadrados ordinales.

### 3.6.3 Método de mínimos cuadrados ordinales

El método de los mínimos cuadrados ordinarios u ordinales (MCO), tomado de Guajarati (2009), es el método de estimación más habitual cuando se realiza el ajuste de un modelo de regresión lineal en los parámetros, aunque no es el único. La expresión general de un modelo de regresión, para un total de  $k$  variables explicativas es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + U$$

Donde  $Y$  es la variable explicada, las  $X_j$  son las variables explicativas, y los parámetros  $\beta_j$  son unos parámetros que cuantifican la relación existente entre la variable explicada y cada variable explicativa. El término  $U$ , es una variable aleatoria que recoge la influencia sobre la variable explicada de otras variables explicativas que no hemos tenido en cuenta en el modelo.

El término  $U$  es necesario ya que la variable explicada ( $Y$ ) es una variable aleatoria, pero al otro lado de la igualdad (en el modelo), no son aleatorios ni



los parámetros  $\beta$  ni las variables explicativas  $X$ . Como debe existir una parte aleatoria en ese lado del modelo, se añade el término  $U$ . despejando  $U$ :

$$Y - (\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k) = U$$

Este error es una variable aleatoria con distribución conjunta normal, de valor medio cero y de desviación típica desconocida. El objetivo es estimar el valor de los parámetros  $\beta$  y de la desviación típica del error, usando  $n$  valores observados de las variables. Sustituyendo en el modelo se tiene un sistema de  $n$  ecuaciones con  $n+k+1$  incógnitas, las  $k+1$  incógnitas que son los parámetros  $\beta$  y las  $n$  incógnitas que son el error  $U$ , que nos permitirán estimar luego la desviación típica del error. Al tener más incógnitas que ecuaciones, no hay una única solución.

$$\begin{aligned} Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 X_{11} + \beta_2 X_{21} + \dots + \beta_k X_{k1} + U_1 \\ Y_2 &= \beta_0 + \beta_1 X_{12} + \beta_2 X_{22} + \dots + \beta_k X_{k2} + U_2 \\ &\dots \\ Y_n &= \beta_0 + \beta_1 X_{1n} + \beta_2 X_{2n} + \dots + \beta_k X_{kn} + U_n \end{aligned}$$

Para dar solución y tener una ecuación más es necesario sumar los residuos al cuadrado (SCR). Un valor de SCR grande significa que todos los puntos quedan muy lejos de la recta, mientras que un valor pequeño significa que quedan muy cerca. Cada recta tiene su número, y se puede elegir una de ellas como la mejor de todas por tener ese número pequeño, por pasar lo más cerca posible de las observaciones. La suma de cuadrados de residuo depende de las estimaciones de los parámetros  $\beta$ , por lo que se puede hacer que sea lo más pequeña posible:

$$SCR = \sum_{j=1}^n e_j^2 = \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2 = \sum_{j=1}^n (Y_j - (b_0 + b_1 X_{1j} + b_2 X_{2j} + \dots + b_k X_{kj}))^2$$

Donde los  $b$  que aparecen en la ecuación son las estimaciones de los parámetros  $\beta$ . Al derivar parcialmente respecto a cada  $b$  e igualar a cero (condición de mínimo), se obtiene el resto de las ecuaciones necesarias ( $k+1$ ) para estimar los parámetros del modelo y finalmente la expresión de los estimadores  $b$ . El estimador de los parámetros se obtiene con un simple producto matricial, y la estimación de la varianza del error ni siquiera es una matriz:

El estimador de los parámetros del modelo es:  $b = (X'X)^{-1}X'Y$

El estimador de la varianza del error es:  $\hat{\sigma}^2 = \frac{SCR}{n - k - 1}$

Donde  $Y$  es el vector de la variable a explicar,  $X$  es la matriz de datos. Para que el sistema de ecuaciones tenga solución única (y no sea indeterminado) el producto de matrices  $X'X$  debe ser invertible, y para ello debe cumplirse que:

1. El número de datos sea mayor que el de los parámetros a estimar,  $n > k + 1$
2. No deben existir relaciones exactas entre las variables explicativas  $X$

#### 4. FORMULACION DE UN LODO DE PERFORACION 100% BASE ACEITE DE HIGUERILLA

La selección de un fluido de perforación conlleva una serie de consideraciones que involucran la perforación rápida y eficiente del pozo, la conservación de las características del yacimiento en la zona cercana al mismo, el control de costos, la logística, el control ambiental y la seguridad del personal tanto el que labora en el proyecto como las comunidades de la zona de actividades Adeleye, et al. (2012). En la búsqueda de fluidos que cumplan con los requerimientos técnicos y ambientales, surge la idea de utilizar sustitutos ambientalmente amigables para la fase continua del fluido cuando se usan bases aceitosas, siguiendo con la tendencia generalizada a nivel mundial a este respecto, analizando el aceite de higuera como posible sustituto, considerando que su origen vegetal infiere un comportamiento ambientalmente amigable.

Paralelo a ello, el control del daño a la formación, generado a menudo por la interacción con emulsiones y densificantes como la Barita. En el caso de las emulsiones, un aumento del corte de agua desestabiliza la emulsión, causada por la disminución de la estabilidad eléctrica; y para el control de daño de la formación, se considera la sustitución de Barita por Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el cual además de servir como densificante, provee cal al sistema el cual actúa como activador y estabilizador del emulsificante.

Se considera que una perforación es exitosa si la ejecución del programa se ha llevado a cabo sin mayores contratiempos, en el tiempo planeado, con medidas correctas y dentro del panorama de costos pre-establecidos. Para el caso de pozos en los que se utiliza como fluido de perforación un lodo base aceite, se busca que éste continúe siendo reutilizable una vez se termine la perforación. Los costos de formulación, mantenimiento y manejo del lodo de perforación, incluyen entre otros los costos de los aditivos químicos (incluyendo la fase continua), los servicios de ingeniería del lodo (Well Site), equipos de prueba (PSA/PPT), equipos de control de sólidos y Limpieza química (dewatering).

##### 4.1 CARACTERIZACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA

Dentro de las características que describen estos fluidos base están: la gravedad específica, el punto de ignición (flash point), el punto de anilina, el punto de llama (fire point), el punto de neblina (cloud point), el punto de vertido o fluidez (pour point) y la viscosidad. La gravedad específica, que contribuye significativamente al peso del fluido de perforación y permite el control de la concentración de material densificante; el flash point, como indicador de la volatilidad del aceite. El punto de anilina es un indicador relativo del contenido

de aromáticos en el aceite base. La arcilla organofílica (viscosificante del lodo) se ve afectada 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. Y por último, 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 cumplen esta función de manera exitosa. 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.

#### 4.1.1 Parámetros característicos generales del aceite de higuera

Para establecer las propiedades del aceite de higuera, se mide el punto de ignición, punto de llama y punto de anilina en la Universidad Surcolombiana en los laboratorios de Crudos y derivados, y Química, para los aceites de Higuera, Palma y Diesel. A continuación, en la tabla 10, se muestran los datos del aceite de Higuera.

Tabla 10. Propiedades del aceite de higuera.

Propiedad	Condiciones Atm/psi	Resultados (°C)
Punto de ignición - flash point	0.949/13.94	290
Punto de llama - fire point	0.949/13.94	320
Punto de anilina - aniline point	0.949/13.94	100

Con base en las características obtenidas, se puede decir que el aceite de Higuera tiene bajo contenido de aromáticos, lo que es bueno considerando su afectación a los elastómeros que hacen parte de los componentes de equipos y componentes de perforación. Por otra parte los altos valores de “flash point” y “fire point”, indican que es un aceite operativamente seguro.

La densidad relativamente es alta (0,958 gr/cc), por lo que se puede afirmar que se necesitaría menos densificante en la formulación del lodo y hace más viable la utilización del CaCO<sub>3</sub>. Se realizó la medición de la densidad a temperaturas de 22, 50, 65, 80 y 120°C, obteniendo un valor constante de 7,93 lb/gal; en tanto que la estabilidad eléctrica fue de 1999, permaneciendo constante a las temperaturas de prueba.

#### 4.1.2 Modelo reológico del aceite de higuera

En la tabla 11, se muestran las mediciones reológicas realizadas al aceite de higuera, realizadas en el laboratorio de Fluidos de perforación y

completamiento de la Universidad Surcolombiana y en el laboratorio de la empresa Fluidos y Servicios.

Tabla 11. Pruebas preliminares del aceite de higuera

Parametros	Castor Oil 22°C (71.6°F)	Castor Oil 50°C (122°F)	Castor Oil 65°C (149°F)	Castor Oil 80°C (176°F)	Castor Oil 120°C (248°F)
Densidad (lb/gal)	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93
Ø600	-	-	127	72	35
Ø300	-	162	66	39	18
Ø200	-	115	44,6	26	12
Ø180	-	108	41,5	24,5	11
Ø100	214	55	22	13	6
Ø90	193	54	14	13	5,5
Ø60	129	37	12,5	8,5	3,5
Ø30	64	19	7	4	2
Ø6	15	4	1,5	1	1
Ø3	7	2	0,8	0,5	0
Ø1.8	4	1	0,1	0	0
Ø0.9	2	0,5	0	0	0

Hubo algunas situaciones en las que no se pudo leer los valores de reología debido a que superaban el rango del dial, por lo que se coloca (-) como indicativo de la imposibilidad de lectura, lo cual no es limitante para el cálculo de la viscosidad aparente, que matemáticamente es la pendiente de la línea formada.

La variación de la estabilidad del aceite respecto a la temperatura, contempla estabilidad a 80°C, empieza a apreciarse surcos como ondas de distorsión del color del aceite, al elevar la temperatura a 90°C y el comportamiento persiste hasta los 120°C.

Si se analiza los datos de esfuerzo y velocidades de corte obtenidos con ayuda del viscosímetro de 12 y 8 velocidades, se muestra, en la figura 28, que la relación entre esfuerzo cortante y tasa de corte es directamente proporcional lo que evidencia el comportamiento Newtoniano, en el que la temperatura juega un papel importante en la disminución de la pendiente, que se traduce en la disminución de la viscosidad por efecto de la temperatura.

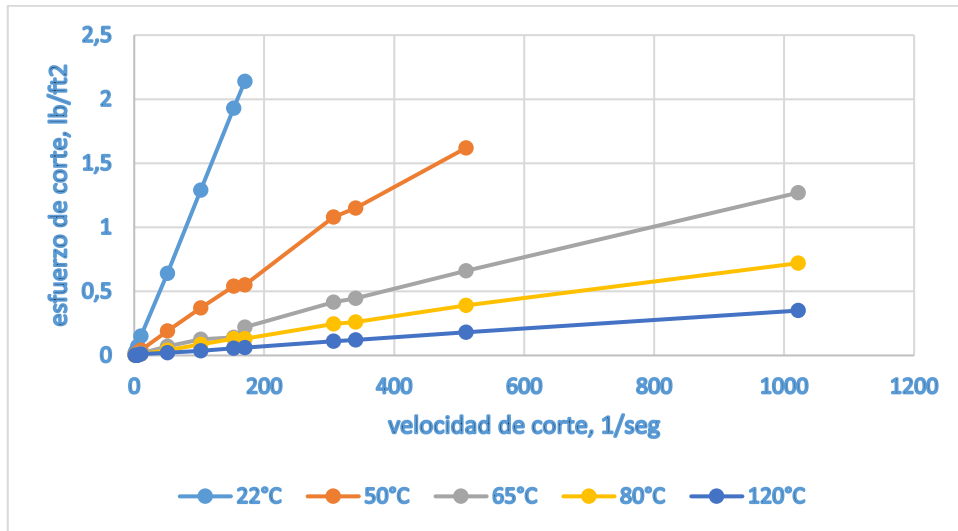


Figura 28. Relación de tasa de corte vs velocidad de corte, pruebas preliminares. Aceite de higuera.

Según la norma API RP 13B, al graficar la información de la tabla 11, en escala Log-Log, ver figura 29, si el comportamiento del aceite describe una línea recta, con pendiente uno (1), en este caso de 0,9935, se dice que es un fluido Newtoniano.

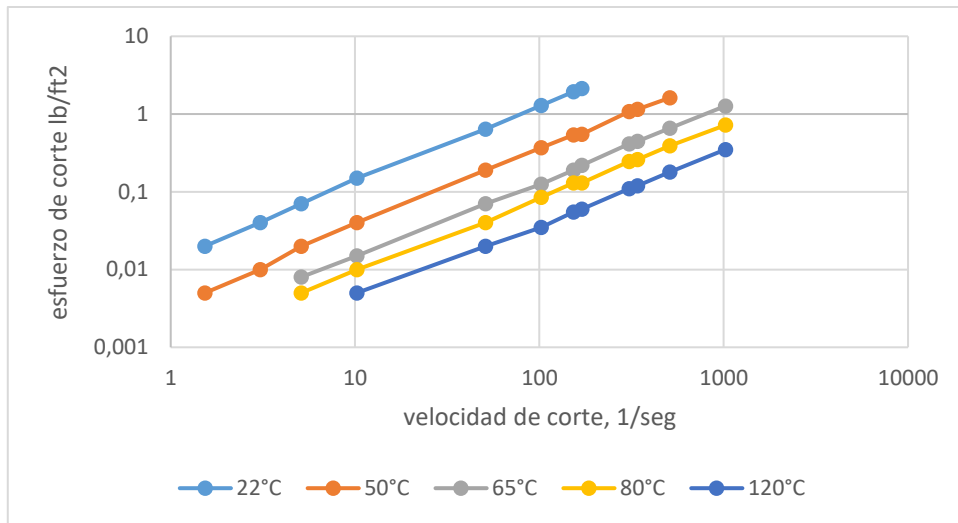


Figura 29. Relación tasa de corte vs velocidad de corte. Pruebas preliminares aceite de higuera log-log

Por lo que se concluye que el aceite de higuera se comporta como un fluido Newtoniano, cuya viscosidad disminuye por efecto del aumento de temperatura.

## 4.2 ENSAYOS, EQUIPOS Y METODOLOGIA DE FORMULACION

### 4.2.1 Metodología de formulación del fluido de perforación

La formulación del fluido base aceite de higuierilla seguirá el diagrama de flujo presentado en la figura 30, el cual se centra en el desempeño en la limpieza y la menor afectación al yacimiento, medidas a través de la reología y filtrado básicamente.

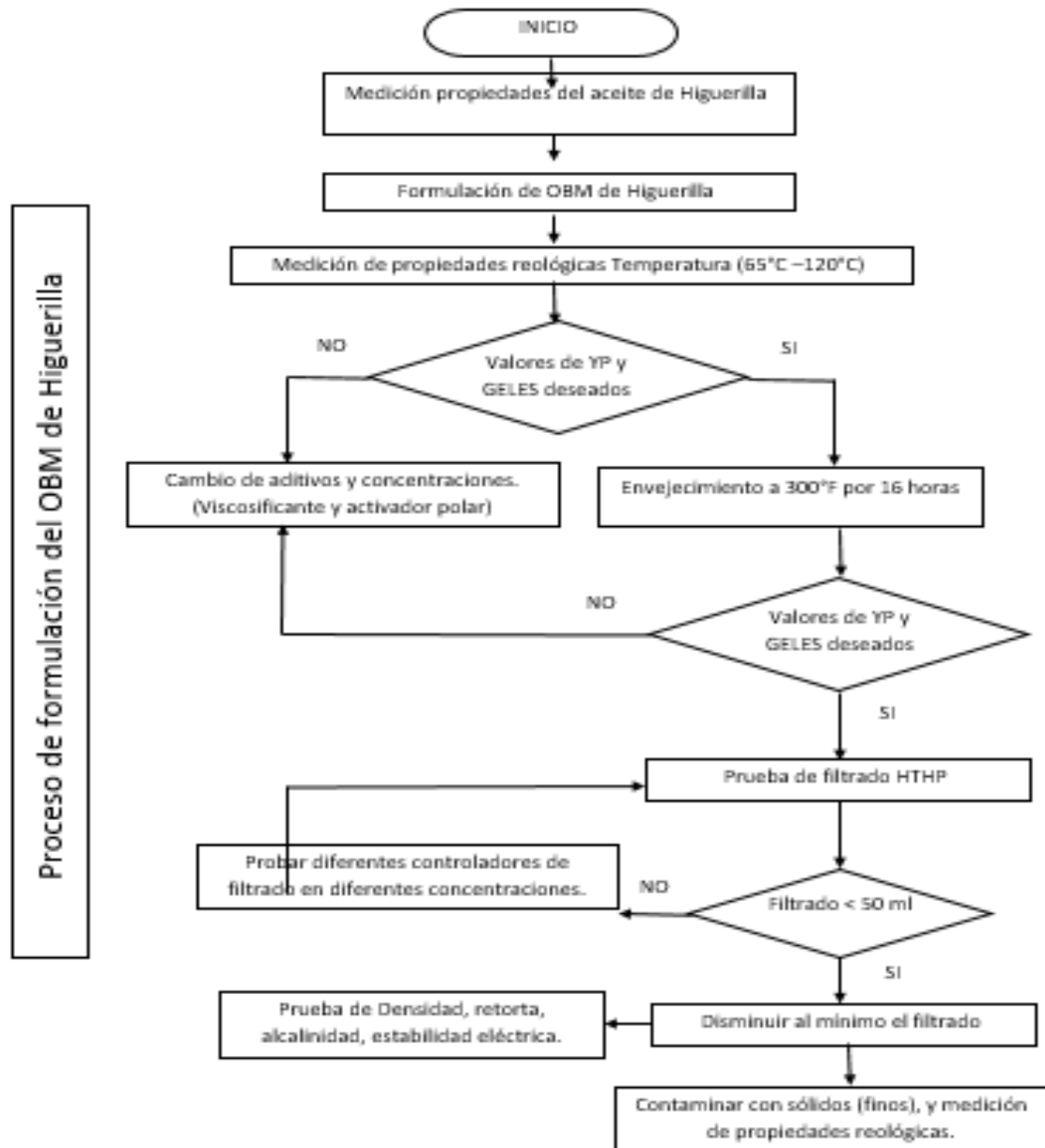


Figura 30. Proceso metodológico en la formulación del lodo base aceite de higuierilla

#### 4.2.2 Equipos utilizados en la formulación del lodo base aceite de higuierilla

Los ensayos se llevan a cabo en las instalaciones de la planta de Fluidos y Servicios Ltda. Los equipos son de fabricación Ofite Testing Equipment, INC. se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Equipos utilizados en los ensayos

EQUIPO		CARACTERISTICAS
Viscosímetros	Viscosímetro 800 y termocopa, Ofite	Viscosímetro de 8 Velocidades (Rpm) (600, 300, 200, 100, 60, 30, 6, y 3), con una precisión en las medidas de 0,1.
	Viscosímetro HP-HT, Ofite	Opera hasta los 30,000 psi y 500°F, a tasas de corte desde 0,1 sg <sup>-1</sup> . Dirigido por el software ORCADA™.
Filtroprensa	Filtroprensa HP-HT con celda roscada de 500 mL, Ofite.	Condiciones máximas de prueba de 500°F y 5,000 psi. Usar papel filtro de 2.5", Box de 100.
Horno de Rolado	Modelo 5 - Horno de rodillos, Ofite	8 celdas de 500 mL, a temperaturas entre 100°F y 450°F, a 25 Rpm.
Balanza de Lodos	Escala - 4, Ofite	6,6 - 23 lpg, 49 - 172lb/ft <sup>3</sup> .
Retorta	Retorta electrónica de 10 mL, Ofite.	Máxima temperatura 1000°F, celda de 10 mL.
Estabilidad	Probador de estabilidad de emulsiones, Ofite	Rango de medición de 3 - 2000 Voltios.
Mezclador	Mezclador Hamilton Beach	Mezclado de 3 muestras simultaneas.

#### 4.2.3 Ensayos y procedimientos de formulación del fluido

Los tiempos de mezcla y orden de los aditivos son fundamentales en la formulación de lodos de perforación, por lo tanto se seguirán los tiempos y orden para cada aditivo presentado en la tabla 13.

Tabla 13. Orden y tiempo de mezcla del proyecto.

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



La formulación busca que el fluido cumpla con la adecuada limpieza del pozo y estabilidad, a las condiciones indicadas en la API RP 13B-2; se rige por las siguientes condiciones:

- Realizar envejecimiento a las muestras de lodo que obtengan un valor de cedencia > a 10 lb/100ft<sup>2</sup>, 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).

#### 4.3 FORMULACION INICIAL

##### 4.3.1 Selección de aditivos

Se realizaron pruebas preliminares a temperatura ambiente para la selección de aditivos, hasta conseguir las siguientes 9 formulaciones que de alguna manera permiten describir el comportamiento general obtenido y las tendencias que se presentaron, para posteriormente definir una formulación óptima que a su vez evaluar el comportamiento del aceite de higuera como fase continua, ver tabla 14.

Tabla 14. Formulación inicial del fluido de perforación base aceite de higuera

ADITIVO	FORMULACIONES, Concentración (Lb/bbl)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aceite de higuera	0,82	0,82	0,82	0,87	0,87	0,79	0,72	0,72	0,72
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

Para estas 9 formulaciones, se realiza la reología, ver tabla 15, para observar el comportamiento, ver figura 31, y poder definir cuál es la formulación que a temperatura ambiente va presentando la mejor tendencia.

Tabla 15. Propiedades reológicas de los fluidos de perforación base aceite de higuera formulados (lb/100ft<sup>2</sup>)

		RPM							
		600	300	200	100	60	30	6	3
FORMULACION	1	75	38	27	17	12	8	4	3
	2	64	33	23	12	8	5	2	1
	3	53,5	49,5	44,6	35	22	11	1,5	0,8
	4	80	80	71	56	44	21	3	2
	5	150	135	121	101	78	52	27	5
	6	101	83	75	59	45	22	5	2
	7	144	123	109	89	68	39	18	8
	8	57	54	50	39	25	17	4	2
	9	161	132	122	104	80	56	31	10

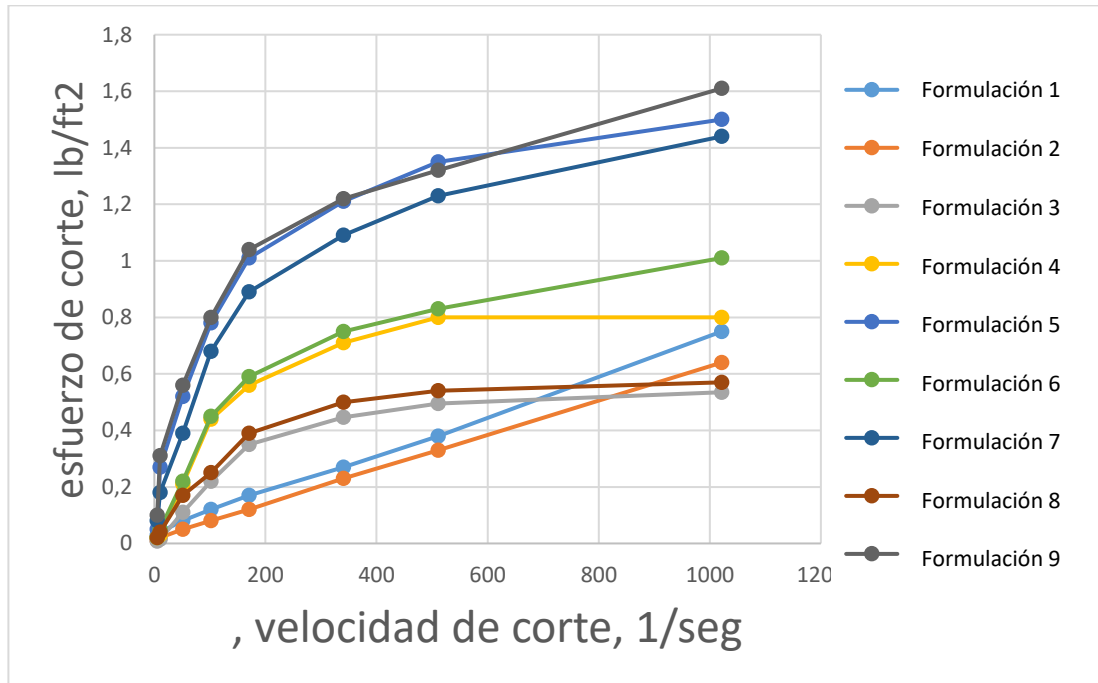


Figura 31. Reograma de las 9 formulaciones de fluido de perforación base aceite de higuera

Con base en la información de la tabla 15 y la figura 31, para cada una de las formulaciones se aprecia un comportamiento específico. Las formulaciones 5, 6, 7, 8 y 9, presentaron las tendencias más definidas y ajustadas al modelo

Ley de Potencia. Para las formulaciones 1, 2 y 3, la variación en la concentración de la arcilla organofílica no muestra variaciones considerables en la reología y el filtrado HT-HP arrojó un valor incontrolable (50 ml). Por lo que hace necesario tener en cuenta el uso de activadores polares de diferentes fabricantes, relacionados en la tabla 16.

Tabla 16. Activadores polares usados en el proyecto

ACTIVADOR DE PRUEBA	NOMBRE
Activador 1	Glicerina
Activador 2	Activful
Activador 3	FYS I
Activador 4	FYS II

Estos activadores polares se usaron en las formulaciones de 4 a la 9. Se descartan las formulaciones 1 a la 3, pues no han sido eficientes considerando la reología.

La Glicerina (Activador 1) se usa en la formulación 4, con la idea de realizar a futuro lodos de emulsión inversa, y con base en información que algunas empresas han utilizado glicerina buscando el sustituto del agua, con el fin de no hidratar las arcillas con éste tipo de emulsiones. Para concentraciones de Glicerina de 22 lb/bbl la pendiente de las curvas reológicas aumenta considerablemente pero a bajas ratas la resistencia de geles no presenta un buen comportamiento, pues se mantienen muy bajos y no son influyentes en la obtención de un buen Índice de Capacidad de Acarreo (ICC), como se muestra posteriormente.

El ACTIVFUL (Activador 2), usado en la formulación 5, respondió elevando los valores de viscosidad, pero los geles siguen siendo bajos y se observa decantación de sólidos bajo condiciones estáticas.

Para las formulaciones 6 y 7 se realiza una combinación de la Glicerina y el ACTIVFUL como activadores polares, se aumenta la concentración de arcilla organofílica, pero se observa que los geles no aumentan proporcionalmente al incremento de los aditivos. Además al usar ACTIVFUL la formación de espuma causa que las mediciones de densidad sean erróneas.

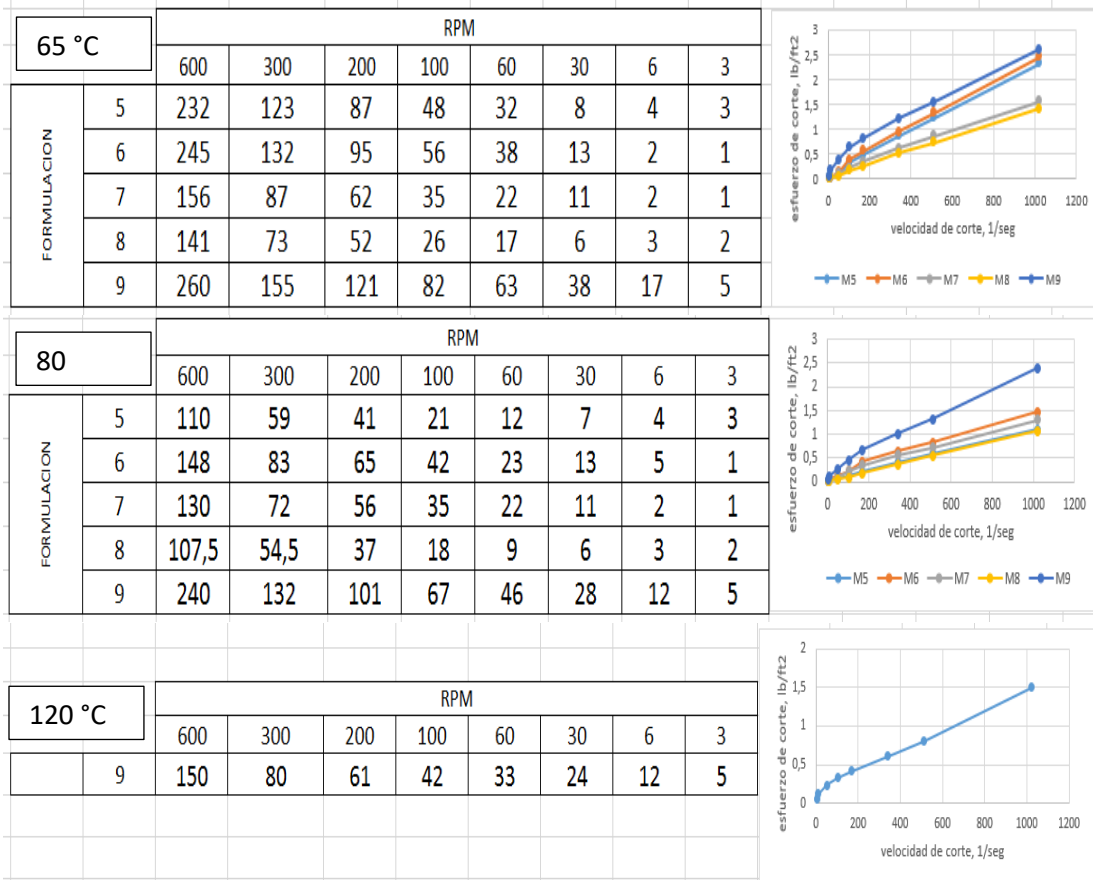
El activador I de FYS (fluidos y servicios), usado en la formulación 9, permite que se obtenga una viscosidad alta y aumenta considerablemente los valores de geles, ubicándolos dentro de la zona alta de los rangos para lograr una buena limpieza del pozo.

El activador 4 (FYS II), en la formulación 8 no arroja resultados favorables en cuanto a geles por lo tanto se procede a envejecer los fluidos que proporcionaron los mejores comportamientos reológicos.

#### 4.3.2 Envejecimiento de los fluidos formulados

La norma API RP 13B-2 sugiere las temperaturas de 65, 80 y 120°C para envejecimiento de los fluidos y posterior medición reológica, lo cual se realiza obteniendo la información presentada en la tabla 17, en la cual se relacionan los valores reológicos con mediciones a 65 y 80°C, ya que solo la muestra 9 soportó el envejecimiento a 120°C sin evidenciar deterioro del fluido.

Tabla 17. Reología a diferentes temperaturas



Para la muestra 5 el volumen de filtrado HP-HT fue de 62 cc/30 min, para la muestra 6, fue de 60 cc/30 min, para la muestra 7, el volumen de filtrado fue de 65 cc/30min, para la muestra 9 a los 120°C la pérdida de filtrado fue de 50 cc/30min, para las muestras 8 y 9 a 65 y 80°C el volumen de filtrado fue incontrolable.

Con base en lo anterior se selecciona la formulación 9 como la formulación óptima, para continuar realizando los ensayos del aceite de higuera.

#### 4.3.3 Estabilidad eléctrica

La formulación 9 muestra el mejor comportamiento reológico y buena estabilidad eléctrica (>850nV), el inconveniente que persiste es el alto volumen de filtrado obtenido, pero sigue siendo el menor de los medidos.



Figura 32. Fluido de perforación base aceite de higuera.

#### 4.3.4 Control de pérdida de filtrado

Para buscar subsanar el inconveniente del alto volumen de filtrado, se prueba con varios controladores de pérdida de filtrado (ver tabla 18): Gilsonita, CaCO<sub>3</sub> en varios mallajes (600/400), asfalto (líquido y sólido) e IRF (Reductor de filtrado polimérico probado como fluido no invasivo), conservando constantes los demás aditivos ya probados en la formulación 9. Se corrieron los ensayos presentados, sin envejecimiento del fluido a 49±3°C como recomienda el API RP13B-2, para 7 formulaciones.

Tabla 18. Ensayos de controladores de pérdida de filtrado

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

En seis de las siete formulaciones planteadas no hubo mejoría en el control de volumen de filtrado, en tanto que en la formulación 7, es decir en la que usó

una mezcla de Gilsonita y  $\text{CaCO}_3$  en dos mallajes (400 y 600), se observa una reducción del volumen de filtrado a un valor de 29 mL (ver figura 33), que aún se encuentra lejos de los valores óptimos que deben estar por debajo de 5 mL, se aprecia un revoque grueso de 0,55 mm flexible y suave. Sin embargo, muestra una buena tendencia, que puede mejorarse modificando la selección de tamaño de grano del  $\text{CaCO}_3$  empleado. Por lo que se prueba nuevamente una formulación adicional con 120 Lb/bbl de  $\text{CaCO}_3$  en mallas 150/400 y teniendo una densidad de 10 ppg, ver tabla 19.



Figura 33. Filtrado OBM 30 mL 10 ppg, 120 lb/bbl de  $\text{CaCO}_3$  malla 400/600.

Tabla 19. Dis. 1. Formulación con controlador de pérdida de filtrado. 10 ppg

Componente	Concentración (lb/bbl)	Propiedades a $49\pm 3^\circ\text{C}$	
Aceite Higuera	0.8	VP (Cp)	103
Arcilla Organ.	14	YP (lb/100ft <sup>2</sup> )	52
Humectante	1	YS (lb/100ft <sup>2</sup> )	5
Emulsificante	2	Gel 10 Seg.	12
FYS I	7	Gel 10 Min.	12
Gilsonita	10	Filtrado HT/HP (ml)	2
$\text{CaCO}_3$	120 (150/400)	Densidad (ppg)	10

Con esta formulación se obtuvo buenos resultados ( $<5.0$ ), teniendo un valor a 30 min en filtroprensa HP-HT de 1,8 mL (ver figura 33), pero es conveniente observar el comportamiento del fluido a una menor densidad y con menores concentraciones de sólidos, por lo que se diseña un nuevo fluido de 9 ppg, disminuyendo la concentración de  $\text{CaCO}_3$  con el mismo mallaje ya probado, obteniéndose los resultados presentados en la tabla 20.

Tabla 20. Dis. 2. Formulación con controlador de pérdida de filtrado. 9 ppg

Aditivo	Concentración (Lb/Bbl)	Propiedades a $49\pm 3^\circ\text{C}$	
Aceite de higuera	0,72	VP (Cp)	108
Arcilla Organofílica	12	YP (lb/100ft <sup>2</sup> )	11
Humectante	1	YS (lb/100ft <sup>2</sup> )	2
Emulsificante	2	Gel 10 Seg.	4
OT I	7	Gel 10 Min.	4
Gilsonita	10	Filtrado HT/HP (ml)	2,0
$\text{CaCO}_3$ malla 150	32,5	Densidad (ppg)	9
$\text{CaCO}_3$ malla 400	32,5		

Para corroborar los parámetros, se realiza el envejecimiento (rolling up) a 300 °F y a 100 Psi de presión por 16 horas, obteniendo los resultados presentados en la tabla 21 y el reograma en la figura 34.

Tabla 21. Propiedades OBM. Lodos envejecidos por 16 horas

		RPM							
		600	300	200	100	60	30	6	3
FORMULA	9 ppg	216	125	80	31	15	7	4	3
	10 ppg	231	135	91	42	23	13	5	1

El filtrado HPHT para el lodo de 9 ppg fue de 2,0 cc/30 min y para el lodo de 10 ppg fue de 1,9 cc/30 min.

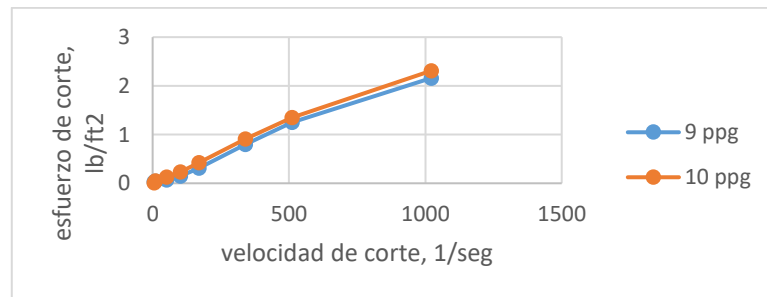


Figura 34. Reograma de los lodos formulados de 9 y 10 ppg, envejecidos.

Como se observa en la figura 35, el revoque formado es delgado (1/32”), flexible y semipermeable, ideal para operaciones de perforación.



Figura 35. Filtrado OBM 1,9 mL 10 ppg 65 lb/bbl de CaCO<sub>3</sub> malla 150/400 post envejecimiento a 300°F y 100 psi

#### 4.3.5 Contenido de sólidos y líquidos - retorta

Ambos diseños del fluido base aceite (Oil base mud - OBM de Higuera 1 y 2) tienen propiedades reológicas deseadas, y en cuanto a los valores de

contenido de líquidos y sólidos tomados del ensayo de retorta, se observan en la tabla 22 los valores y en la figura 36 las imágenes de los líquidos obtenidos.

Tabla 22. Sólidos y líquidos – retorta. Lodos Envejecidos por 16 horas

PROPIEDADES		
Densidad (ppg)	9 ppg	10 ppg
Líquidos (%)	74	71
Sólidos (%)	26	29

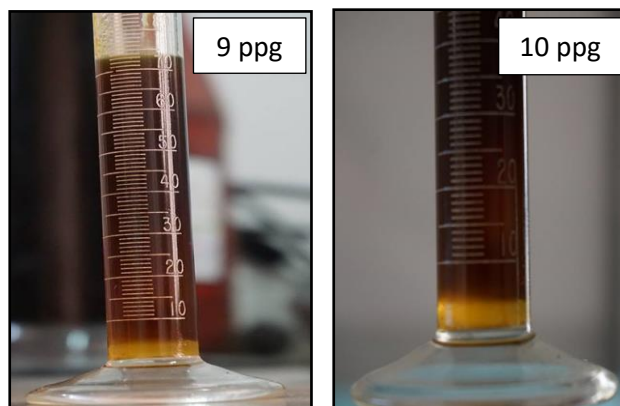


Figura 36. Líquidos del ensayo de retorta post envejecimiento a 300°F y 100 psi

El líquido tiene tonalidades gradacionales, lo que puede ser evidencia de degradación del aceite, lo cual no se pudo evaluar, o es la mezcla del aceite con el activador polar (FYS I), emulsificante y humectantes, que son aditivos líquidos. La prueba de la retorta llegó a un máximo de temperatura de 411°C (772°F); según Pérez (2009), los triglicéridos empiezan a descomponerse a los 260°C (500°F), sabiendo que el aceite de higuera está compuesto de triglicéridos y que la temperatura de descomposición ha sido sobrepasada, existe la posibilidad de que el aceite al evaporarse y condensarse nuevamente permita que la integridad o estructura química cambie. En la figura 34 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 higuera en condiciones normales, lo que lleva a pensar que en efecto pudo ocurrir una descomposición o degradación del aceite debido a la alta temperatura.

#### 4.4 CARACTERIZACION REOLOGICA

Tomando como base la formulación 9 a densidades de 9 y 10 ppg, se realizó la medición de reología a diferentes condiciones de envejecimiento, 65, 80 y 120°C y una máxima temperatura de 150°C que es la capacidad máxima de los equipos, considerando que el activador polar (FYS I) no genera espumas, por tanto la densidad se puede leer correctamente y permanece estable.



La información adquirida se usó para determinar el modelo reológico del fluido de perforación, formulado usando el aceite de higuera como fase continua, y definir la eficiencia de la limpieza de pozo bajo condiciones específicas, usando el concepto de Índice de Capacidad de Acarreo (ICC); además se realizó un ensayo no convencional con el equipo Ofite 77.

#### 4.4.1 Toma de parámetros reológicos y construcción de reogramas

Los ensayos reológicos incluyen la lectura de los esfuerzos cortantes, frente a diferentes velocidades de corte, ver tabla 23, lo cual permite establecer el modelo de flujo que mejor describe el comportamiento, ver reogramas de la figuras 37 y 38.

Tabla 23. Datos reológicos consolidados de los lodos de 9 y 10 ppg formulados

	<b>65°C</b>	<b>80°C</b>	<b>120°C</b>	<b>150°C*</b>
	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>
<b>RPM</b>	<b>9 ppg</b>	<b>9 ppg</b>	<b>9 ppg</b>	<b>9 ppg</b>
3	7	10	5	10
6	13	12	8	12
30	41	25	20	24
60	58	39	32	37
100	75	55	47	46
200	112	95	82	95
300	151	132	116	125
600	262	245	210	216
<b>10ppg</b>	<b>65°C</b>	<b>80°C</b>	<b>120°C</b>	<b>150°C*</b>
	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>
<b>RPM</b>	<b>10 ppg</b>	<b>10 ppg</b>	<b>10 ppg</b>	<b>10 ppg</b>
3	13	10	9	11
6	15	13	11	18
30	44	32	23	26
60	62	46	36	31
100	77	59	47	52
200	118	99	93	101
300	155	146	130	133
600	260	252	223	220

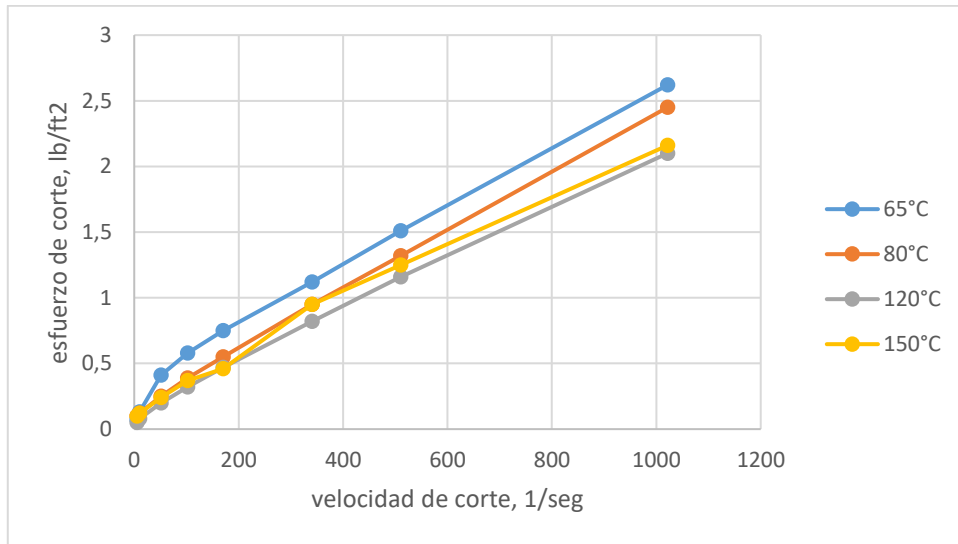


Figura 36. Reograma consolidado del lodo de 9 ppg a varias temperaturas

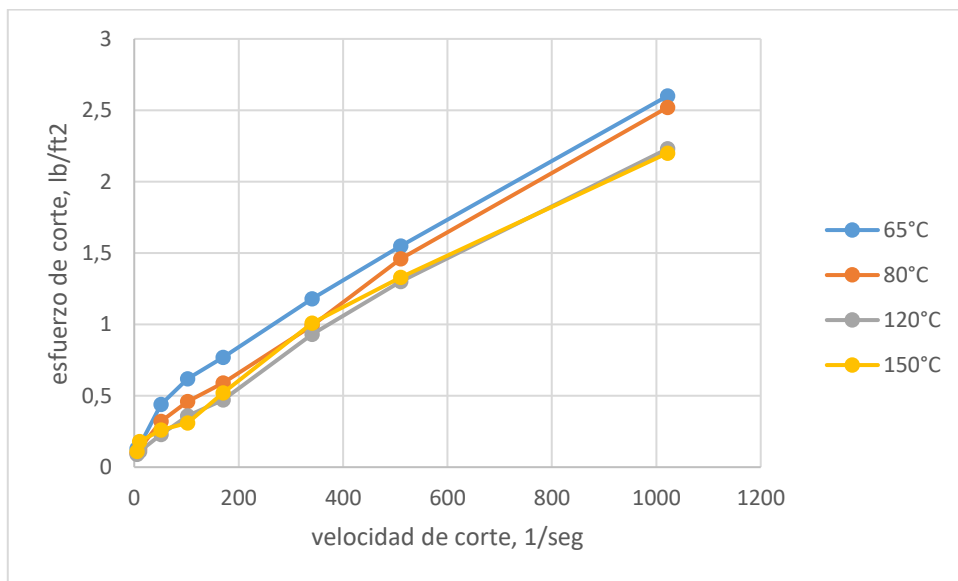


Figura 37. Reograma consolidado del lodo de 10 ppg a varias temperaturas

#### 4.4.2 Análisis de los modelos reológicos

Evidentemente el fluido es No newtoniano, en tanto que los reogramas no describen una línea recta con origen en cero, y tampoco se puede establecer que es plástico de Bingham puesto que además de no ser una línea recta, no hay precisión del punto de corte sobre la abcisa de esfuerzo de corte.

Por tanto, y considerando la forma de los reogramas, se puede indicar que el fluido tiene tendencia al modelo Ley de Potencia, en tanto que describe una

tendencia lineal a velocidades de corte superior a 100 rpm y a rpm más bajas la tendencia es a formar una curva.

La tendencia general para las temperaturas de medición de 65, 80 y 120 °C es de fluido no newtoniano, Ley de Potencia, cuyos esfuerzos de corte disminuyen a medida que la temperatura de prueba es aumentada. Para las mediciones hechas a 150°C el comportamiento presenta algunas diferencias importantes, como es que los esfuerzos de corte han disminuido incluso muy cerca de las mediciones hechas inicialmente con 65°C, rompiendo la tendencia que se presentaba con temperaturas menores, lo que sugiere que el fluido puede estarse desestabilizando. A todas las temperaturas analizadas se observan geles planas o invariables, no muy frágiles.

Igualmente, con las mediciones hechas se realiza el cálculo de Viscosidad considerada como la pendiente de cada una de las curvas, no solo tomando los valores de 600 y 300 rpm, sino la tendencia general de la curva, además del índice de consistencia (n) e índice de comportamiento de flujo (K), con lo cual se describe el grado de adelgazamiento inducido por el corte de un fluido y la viscosidad de un fluido que fluye, respectivamente, obteniendo los resultados presentados en la tabla 24.

Tabla 24. Datos reológicos de los lodos de 9 y 10 ppg formulados envejecidos

	65°C	80°C	120°C	150°C*
	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>
	9 ppg	9 ppg	9 ppg	9 ppg
μ (cp)	114,912	110,124	95,76	95,76
n	0,7945568	0,8917259	0,8557675	0,7886452
K	541,32978	258,70353	284,27397	464,89005
	65°C	80°C	120°C	150°C*
	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>
	10 ppg	10 ppg	10 ppg	10 ppg
μ (cp)	114,912	114,912	100,548	100,548
n	0,7458103	0,7869983	0,7780802	0,7256559
K	752,28454	548,57753	516,29533	731,64139

Con lo anterior se puede establecer que los fluidos analizados presentan una viscosidad que permanece relativamente constante con las variaciones de temperatura, exceptuando los análisis realizados a 150°C.

#### 4.4. INDICE DE CAPACIDAD DE ACARREO

Para evaluar la efectividad de la limpieza del pozo, suministrada por el lodo, se recurre al cálculo del índice de acarreo (CCI –carrying capacity index), según las indicaciones de los manuales utilizados como bibliografía (M.I. Swaco, BP). Esta valoración de ICC (ver tabla 25) se hace bajo las siguientes consideraciones: Sección de 12 ¼”, diámetro del hueco abierto 12 ¼”, diámetro externo del drill pipe 5 pulgadas, diámetro del revestimiento 9 5/8” y caudal de la bomba 500 gal/min (PZ-9).

Tabla 25. Índice de capacidad de acarreo. Caudal 500 gal/min

	65°C		80°C		120°C		150°C*	
	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2
	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg
vel anular	97,9910045	97,9910045	97,9910045	97,9910045	97,9910045	97,9910045	97,9910045	97,9910045
CCI	1,19352261	1,84292794	0,57038891	1,34389159	0,62676656	1,26480744	1,02498846	1,79235687

Los cálculos de ICC se realizan considerando un pozo promedio, usando un caudal medio de una bomba PZ-9 Gardner Denver, obteniendo que el lodo cuya densidad es de 9 ppg, presenta un ICC para una limpieza de pozo eficiente a temperaturas de ensayo de 65 y 150°C, en tanto que para 80 y 120°C, la limpieza sería aceptable. Para el caso del lodo de densidad de 10 ppg, en todas las temperaturas de ensayo el ICC indica una eficiente limpieza del pozo.

Utilizando un caudal de 900 Gal/min, máximo caudal de bombeo, según Halliburton Drilling Manual, se calcula el ICC, como se presenta en la tabla 26.

Tabla 26. Índice de capacidad de acarreo. Caudal 900 gal/min

	65°C		80°C		120°C		150°C*	
	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2
	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg	9 ppg	10 ppg
vel anular	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808
CCI	2,14834069	3,31727028	1,02670005	2,41900486	1,1281798	2,27665339	1,84497924	3,22624237

Los cálculos de ICC se realizan considerando el mismo pozo promedio, usando un caudal máximo de bombeo, de lo que se obtiene que la limpieza de pozo sería eficiente a todas las temperaturas de ensayo, para cualquiera de los dos lodos analizados.

#### 4.5 PRUEBA NO CONVENCIONAL

Este ensayo no hace parte de los objetivos del proyecto, pero se toma al tenerse la oportunidad de usar un equipo de lecturas electrónicas y bajo condiciones de confinamiento. Para corroborar la información obtenida hasta el momento en cuanto al comportamiento reológico de los fluidos diseñados, se procedió a realizar los ensayos pertinentes usando el Viscosímetro Ofite 77(ver figura 38), equipo automático diseñado por Ofite Inc., en semejanza al fabricado por Fann Instruments Company, Fann 70/75, bajo el desarrollo de “The Sandia National Laboratories, el cual permite determinar las propiedades reológicas de los fluidos de perforación a presiones y temperaturas elevadas.



Figura 1. Equipo OFITE 77. Viscosímetro HT-HP.

Este equipo requiere que el fluido de perforación a probar sea compatible con el fluido de confinamiento del equipo, de tal forma que no se formen emulsiones, que pueden deteriorar el equipo e inducir lecturas erróneas. Una vez corrida la prueba de compatibilidad se observa que los fluidos son compatibles, ver figura 39, las fases permanecen fácilmente distinguibles. Esto permite la realización del ensayo, el cual genera automáticamente el reograma a diferentes temperaturas de muestreo, ver figuras 40 y 41, se toma un fluido de 9,0 ppg ya que por disponibilidad del equipo solo se permite la corrida de un solo ensayo.



Figura 2. Prueba de compatibilidad OBM de Higuierilla y Fluido de confinamiento.

Los datos ofrecido por este equipo constituyen información acerca de la tendencia de los lodos fabricados a base aceite de higuierilla, puesto que las mediciones no se pudieron realizar a las condiciones de prueba que se venían trabajando, lo que se puede ver en la figura 40, con temperaturas de prueba a 107, 150, 184 y 200°F.

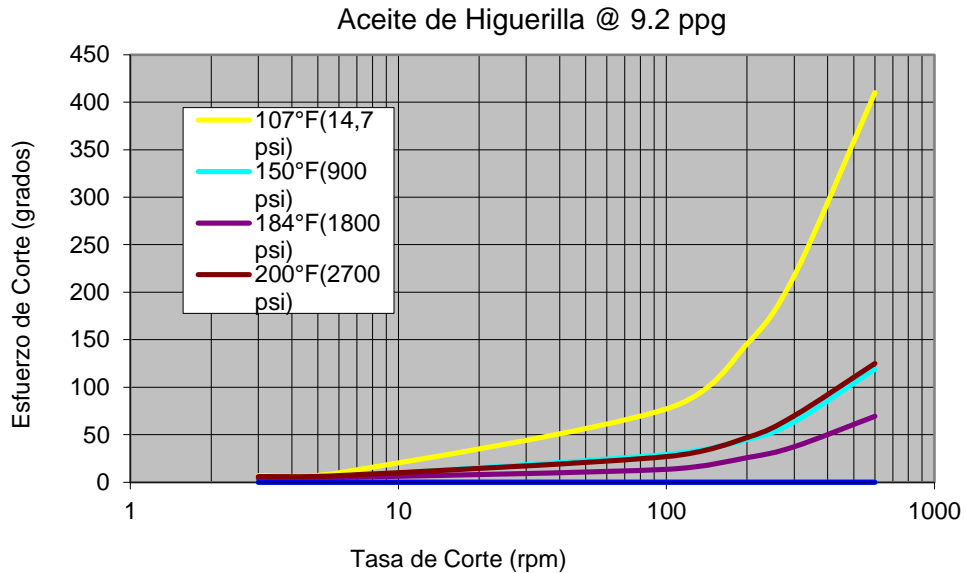


Figura 3. Comportamiento reológico OBM Higuierilla- OFITE 77.

Los datos presentados son los correspondientes a la etapa de calentamiento (Heat up). El equipo asume intrínsecamente que se trata de un fluido no newtoniano plástico de Bingham, por lo que automáticamente emite los valores calculados de viscosidad plástica, punto cedente y geles, como se observa en la figura 41.

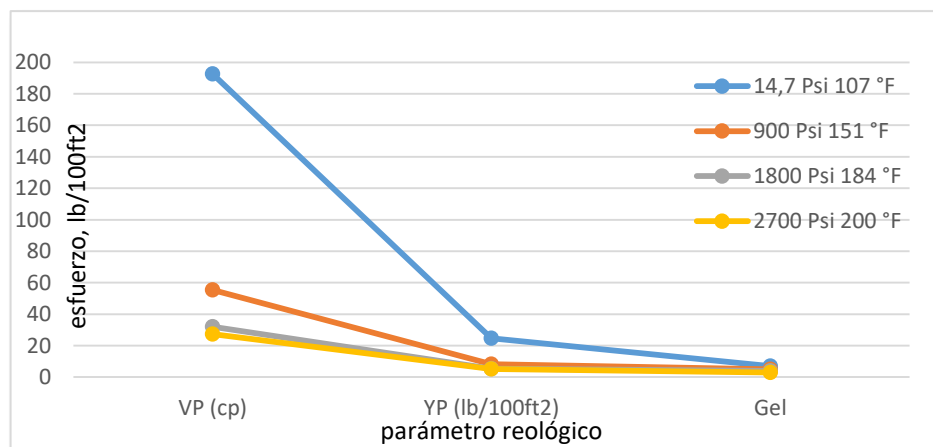


Figura 41. Valores Reológicos OBM Higuierilla- Ofite 77.

Con este ensayo se confirma el comportamiento ya descrito para el fluido base aceite de higuierilla. Es interesante observar que al medir la densidad del fluido en una balanza de lodo convencional, se obtuvo un valor de 9,0 ppg, en tanto que el equipo hace una medición directa de 9,2 ppg, probablemente porque la presurización del sistema permite el desplazamiento de cualquier burbuja que pudiera quedar dentro del mismo. Se observa 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 (VP), mientras que el punto cedente - YP y fuerza de gel sufren cambios menores. Operacionalmente el YP y la fuerza de gel son las propiedades de mayor importancia, que generan 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 necesitarán menos energía para circular, por esta razón los resultados obtenidos se califican positivamente.

#### 4.6 COMPARACION DE LODOS BASE ACEITE DE HIGUERILLA, PALMA Y DIESEL

Una vez formulado y probado el lodo base aceite de higuierilla, se procede a hacer la comparación con otros lodos base aceite de palma en representación de los aceites vegetales y de aceite diesel como base convencional, empezando con la caracterización general de los aceites base y posteriormente se usa la misma formulación ya probada solo variando la base aceite en estudio. Se realizaron los ensayos de densidad, estabilidad eléctrica y reología, hasta obtener los ICC respectivos y así evaluar el comportamiento comparativo de los diferentes fluidos.

##### 4.6.1 Características generales de aceites diesel, de palma e higuierilla

Se midió en los laboratorios de la Universidad Surcolombiana (Química y Crudos y Derivados), los parámetros de densidad, puntos de vertidos, llama, chispa, neblina y anilina

Tabla 29. Propiedades de los aceites de higuierilla, palma y diesel.

ACEITE	PROPIEDADES					
	Densidad (ppg)	Punto de vertido	Punto de llama	Punto de chispa	Punto de niebla	Punto de anilina
Palma	7,64	23-40	280	341	31	118
Higuierilla	7,98	-33	290	320	NN	212
Diesel	7,09	-18	66	108	-17	145

Al tener un punto de anilina relativamente alto en comparación con los otros aceites de los que se presenta información, el aceite de higuierilla representa

una menor probabilidad de ocasionar daños en los elastómeros del motor direccional situados en la sección de poder. El aceite de higuierilla 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. El aceite de higuierilla, tiene el menor “pour point” o punto de fluidez de los aceites analizados, pese a su alta viscosidad requiere de una temperatura muy baja (-33 °C) para poder fluir.

Los valores de viscosidad cinemática de 47,8 cst para el aceite de palma, 3,95 cst para el diesel y de 292 cst para el aceite de higuierilla. Ver figura 42.

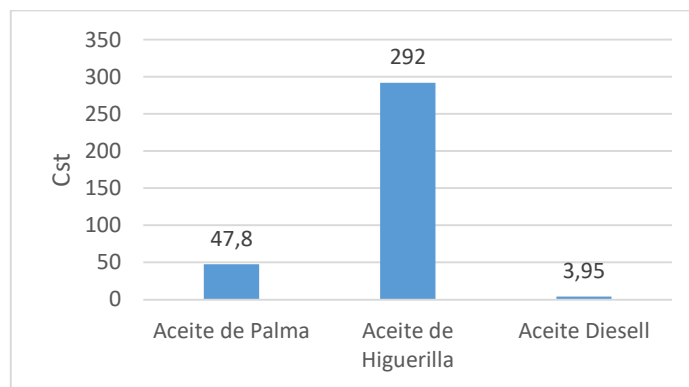


Figura 42. Comparación de viscosidades cinemáticas de aceites vegetales y diesel.

Como se observa en la figura 42, el aceite de higuierilla presenta la viscosidad más alta, esto es debido a las características del ácido ricinoléico que lo compone. Pues su estructura molecular presenta un grupo hidroxilo y un doble enlace en su carbono No. 18.

Siguiendo el instructivo dado por Yassin et al (1991), referente las condiciones óptimas para elegir un fluido base, el aceite de higuierilla cumple los requerimientos, cuyo punto de anilina de 212°F, que está por encima a 65°C (145°F), punto de llama mayor a 100°F y punto de fluidez mayor a la temperatura ambiente, cumplen de manera satisfactoria, en tanto que la viscosidad cinemática, que debe ser baja, para el aceite de higuierilla es muy alta, pero es una característica que puede llegar a contrarrestarse considerando su solubilidad en alcohol; por otro lado, en lo referente a las emulsiones, en el caso del presente proyecto no aplica ya que el estudio se basa en lodo 100% aceite.

#### 4.3.2 Análisis comparativo de parámetros de los fluidos formulados

Una vez se estableció la formulación base, se procede a preparar lodos con las mismas características químicas en cuanto a aditivos y concentración de



los mismos, usando como base los aceites de higuera, palma y diesel y así realizar la comparación de su comportamiento.

#### 4.6.2.1 Formulación

Se formulan los lodos base aceite diesel y palma con la misma composición hecha para el aceite de higuera (ver tabla 30) y se miden parámetros a 65, 80 y 120°C.

Tabla 30. Formulación General (Optima).

Componente	Concentración (lb/bbl)
Aceite (Higuera, Palma, Diesel)	0.8
Arcilla Organ.	14
Humectante	1
FYS I	7
Gilsonita	10
Emulsificante	2
CaCO <sub>3</sub>	120

#### 4.6.2.2 Densidad

Con la formulación se realiza la medición de la densidad, obteniendo los resultados presentados en la tabla 31.

Tabla 31. Comparación de Densidades

LODO	DENSIDAD (libras por galón)
Base Higuera	10,1
Base Palma	9,1
Base Diésel	9,6

El lodo de higuera fue el que tuvo mayor densidad debido a su alta gravedad específica del aceite base, 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.

#### 4.6.2.3 Estabilidad eléctrica

La estabilidad eléctrica de los tres aceites es 1999 voltios (ver figura 43), lo que indica que están 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.



Figura 43. Test de estabilidad eléctrica. Al lodo base aceite de higuierilla.

#### 4.6.2.4 Reología

Se hizo la mezcla para cada fluido con la formulación base, teniendo la gelificación del lodo base aceite diesel, lo que se puede ver en la figura 44; impidiendo realizar los ensayos reológicos. Esto sugiere que se requieren menos aditivos para formular el lodo base diesel, sin embargo esto desviaría la línea de investigación hacia una formulación sobre la cual no funcionaría el aceite de higuierilla, por tanto se realiza las mediciones reológica para los fluidos base aceite vegetal únicamente y los resultados de dichas mediciones de reología se presentan en la tabla 32.

Tabla 32. Comparación reología lodo a base aceites palma e higuierilla

RPM	LODO DE PALMA			LODO DE HIGUERILLA		
	T=65°C	T=80°C	T=120°C	T=65°C	T=80°C	T=120°C
	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>	Lb/100ft <sup>2</sup>
600	54	45	40	260	235	210
300	39	33	30	155	132	115
200	32	28	23	118	95	89
100	29	23	17	77	55	42
60	25	20	15	62	39	32
30	21	17	13	44	25	18
6	16	14	10	15	12	10
3	15	12	9	13	10	8
Gel 10 seg	10	7	5	13	10	8
Gel 10 min	10	7	5	13	10	8

RPM. Revoluciones por minuto



Figura 44. Fluido formulado con aceite Diesel.

El análisis reológico de los aceites vegetales, se presenta en la tabla 33.

Tabla 33. Análisis reológico de los lodos base aceites vegetales

RPM	LODO DE PALMA			LODO DE HIGUERILLA		
	T=65°C	T=80°C	T=120°C	T=65°C	T=80°C	T=120°C
	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2	Lb/100ft2
$\mu$ (cp)	19,152	14,364	14,364	114,912	105,336	95,76
n	0,46921279	0,44719927	0,41479661	0,74581028	0,831639851	0,868251229
K	1055,95004	1024,48721	1139,11524	752,284537	375,8139726	260,7857295
vel anular	176,383808	176,383808	176,383808	176,383808	176,3838081	176,3838081
CCI	4,23724415	4,11099224	4,57096376	3,35044299	1,673759365	1,161459097

La diferencia en la viscosidad plástica de los dos fluidos formulados con bases vegetales muestra mayor estabilidad del esfuerzo cortante frente a la tasa de corte (gradiente de velocidad de corte) para el fluido a base de aceite de palma, sin embargo una vez se supera los 120°C y cuando se realiza el proceso de envejecimiento a 300°F, 100 psi por 16 horas, este lodo pierde completamente su capacidad de fluir formando una masa pastosa difícil de retirar del cilindro de contención del equipo de rolado, escenario en el que el lodo base aceite de higuera continúa fluido y permite la valoración reológica como ya se había establecido con anterioridad, ver reogramas en las figuras 45 y 46.

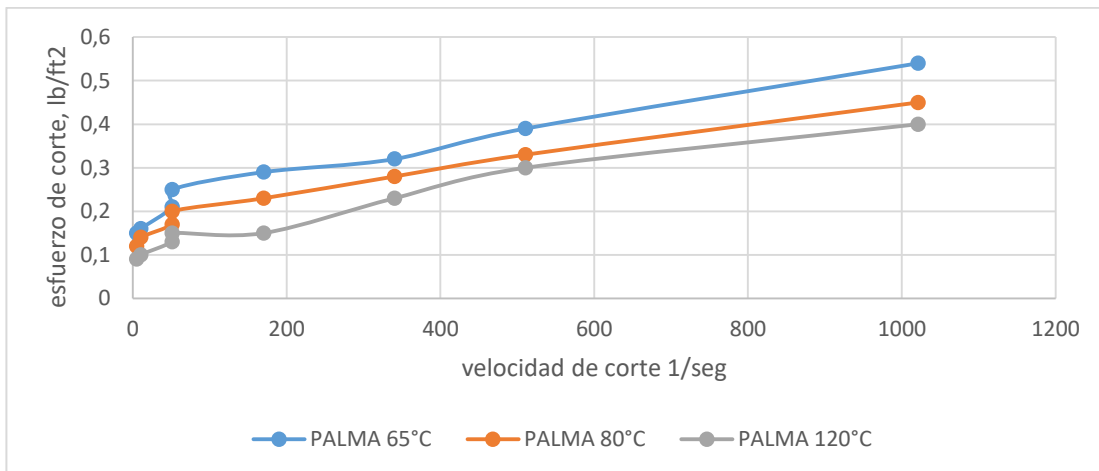


Figura 45. Reograma fluido base aceite de palma

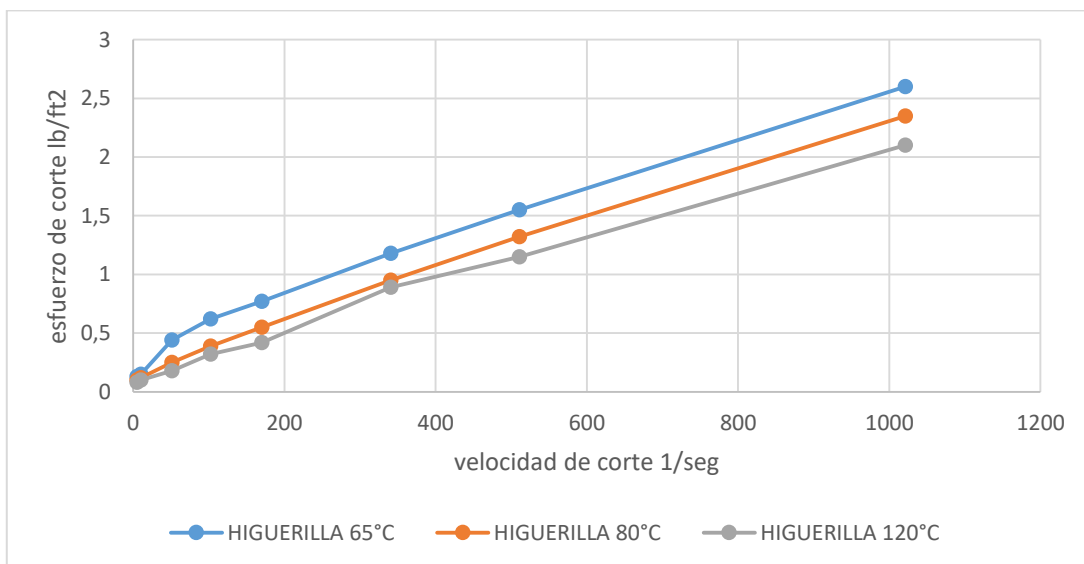


Figura 46. Reograma fluido base aceite de higuera

Las viscosidades 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.

Los inconvenientes de la alta viscosidad se pueden subsanar con el uso de adelgazantes como algún tipo de alcohol, o una técnica o proceso químico, que sugieren nuevos caminos de investigación que van más allá de los objetivos de ésta.

#### 4.7 ENSAYO DE REDUCCION DE VISCOSIDAD

A pesar de no hacer parte de los objetivos del proyecto, se procedió a determinar la curva de viscosidad del aceite de higuera solo y mezclándolo con metanol en una relación 90:10, es decir al 10% de metanol, usando el hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador, en un proceso de transesterificación, obteniendo los resultados presentados en la tabla 34.

Tabla 34. Viscosidad al usar metanol al 10%

T (°C)	$\mu$ (cp)		
	HIGUERILLA	HIGUERILLA + ETANOL	REDUCCION EN LA $\mu$
65	67,0320	33,5160	50,0
70	57,4560	28,7280	50,0
75	43,0920	23,9400	44,4
80	38,3040	23,9400	37,5
85	28,7280	19,1520	33,3
90	23,9400	19,1520	20,0
95	23,9400	14,3640	40,0
100	19,1520	14,3640	25,0
105	19,1520	14,3640	25,0
110	14,3640	14,3640	0,0
115	14,3640	14,3640	0,0
120	14,3640	9,5760	33,3
125	9,5760	9,5760	0,0
130	9,5760	9,5760	0,0

Nota: el cálculo de la viscosidad se hace matemáticamente por pendiente bajo la curva de rata de corte vs esfuerzo cortante, considerando modelo Ley de Potencia.

Graficando los datos de la tabla 34, se obtienen los perfiles de viscosidad presentados en la figura 47.

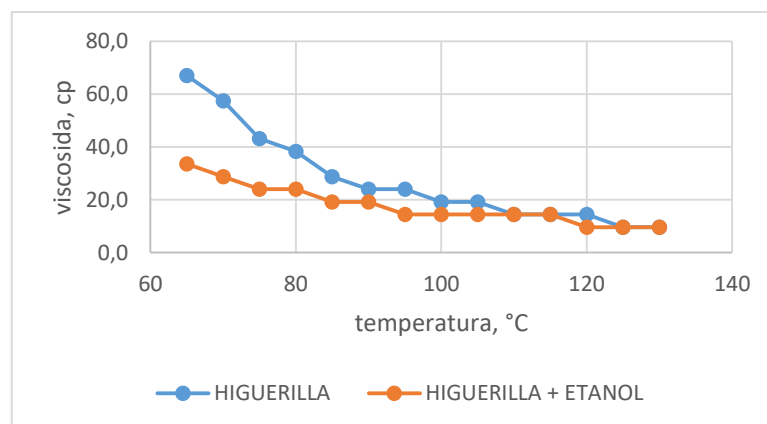


Figura 47. Perfiles de viscosidad aceite de higuera-reducción de viscosidad con metanol

Como se observa en la gráfica No.47, a 65°C que es la temperatura a la cual se debe probar un lodo base aceite según la norma API RP 13B-2. Se observa un diferencial de viscosidad de 35 cp, lo que significa que el metanol sí disminuye la viscosidad plástica al sistema. Este procedimiento se realizó con el fin de mostrar de manera superficial la versatilidad del aceite al ser “alterado” para mejorar sus propiedades.

Los dos fluidos, lodo base aceite de palma y lodo base aceite de higuierilla, comienzan a fluir por encima de las 15 lb/100 ft<sup>2</sup>, lo cual se considera adecuado para un fluido de perforación (Leon Dong Guo, 2013), desde el punto de vista de la capacidad de acarreo, al igual que los geles son muy buenos para mantener sólidos en suspensión; sin embargo al ser muy alto dificultaría la bombeabilidad de los fluidos.

#### 4.8 EVALUACION ECONOMICA DEL LODO FORMULADO

Con base en la formulación del lodo se procede a hacer la evaluación económica, considerando costos de mercado de los aditivos requeridos, con base en los costos suministrados por la empresa Fluidos y Servicios (ver tabla 2), como se muestra en la tabla 35.

Tabla 35. Costos por barril de lodo según formulación general (Optima)

COMPONENTE	CONCENTRACION (lb/bbl)	LODO BASE HIGUERILLA		LODO BASE PALMA		LODO BASE DIESEL	
		COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
ACEITE BASE	0,7714	202,518	156,2223852	104	80,2256	90,63	69,91198
ARCILLA ORGANOFILICA	14	1	14	1	14	1	14
HUMECTANTE	1	0	0	0	0	0	0
FYS I	7	1,2	8,4	1,2	8,4	1,2	8,4
GILSONITA	10	0,4	4	0,4	4	0,4	4
EMULSIFICANTE	2	1	2	1	2	1	2
CaCO3	120	0,048	5,76	0,048	5,76	0,048	5,76
COSTO TOTAL DEL LODO		190,38		114,39		104,07	

Se observa que el lodo más económico es el base aceite diesel con un costo de 104 USD/BB, le sigue muy de cerca con tan solo un incremento del 10% del costo el lodo base aceite de palma con un costo de 114 USD/BB, en tanto que el lodo base aceite de higuierilla tiene un incremento del 83% frente al costo del lodo base aceite de palma con un precio de 190 USD/BB. Es muy probable que el sobre costo se deba a la producción doméstica del aceite de higuierilla, lo que se puede subsanar por los dos frentes de interés en fomentar la producción de dicho aceite, uno es al nivel estatal como cultivo sustituto de los cultivos ilícitos y dos, por el reciente interés de la ANH y Ecopetrol en establecer zonas de alta productividad de higuierilla, para usar su aceite en la producción de biodiesel.

Se estima que al establecerse de manera industrializada el cultivo de higuierilla, el costo del aceite se puede reducir alrededor de un 30%, lo que generaría una reducción total del precio del lodo con dicha base en un 38%, es decir se tendría un lodo a 143 USD/BB y 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, representado en tratamientos de residuos, multas (que pueden alcanzar al 70% del costo de la perforación) y los costos ambientales operacionales o accidentales a que diere lugar.

En mercados más desarrollados, como el Brasil, el aceite de higuierilla es de 50USD/Bbbl, lo que visualiza un precio mínimo de cerca de 72 USD/BB equivalente al 70% del precio del lodo base aceite diesel. Por tanto, el lodo base aceite de higuierilla se convierte en una opción atractiva si se considera que el sobre costo se compensa con menores costos en tratamientos de residuos, menor afectabilidad ambiental, menos daño a los elastómeros de los equipos, entre otros.

## 5. ANALISIS AMBIENTAL DE LOS LADOS BASE ACEITE DE HIGUERILLA

Para la determinación de la amigabilidad ambiental del aceite de higuera, es conveniente realizar la verificación de factores que así lo indiquen, aparte del simple hecho de que es un compuesto de origen natural. Es por ello que esta fase de la investigación se centra en la evaluación del comportamiento de tres especies vegetales y una especie animal acuática, expuestas a un derrame accidental, además de la evaluación de la degradabilidad del aceite de higuera en suelos expuestos a un derrame accidental de lodo base aceite de higuera formulado.

### 5.1 COMPORTAMIENTO DE ESPECIES VEGETALES

Las tres especies vegetales seleccionadas, *Swinglea glutinosa* (Limoncillo), *Tabebuia rosea* (ocobo) y *Phaseolus vulgaris* (frijol), se exponen al derrame accidental de lodos base aceite de higuera, diesel y aceite de palma, a razón de 100 ml por planta, se continúa riego con agua simulando lluvia a razón de 200 ml/día. Se hace la medición de tiempo de supervivencia, altura y follaje, adicionalmente se observa la apariencia y color de las plantas.

#### 5.1.1 Comportamiento de *Phaseolus vulgaris* – Frijol expuesto

Se presenta inicialmente como se realizó la preparación del suelo, siembra y actividades preliminares, para posteriormente presentar las observaciones hechas.

##### 5.1.1.1 Preparación, siembra y acciones preliminares

Se prepararon 40 macetas con suelo de la finca la bonita y abono de ceagrodex al 30%, ver anexo E, conforme a recomendaciones del productor del abono buscando cumplir con los requisitos generales de siembra en suelos ligeros, de textura silíceo-limosa, con buen drenaje y ricos en materia orgánica, con un pH inferior a 8,0 y se localizan donde les dió sol indirecto, se sembró en cada maceta una semilla de *Phaseolus vulgaris* – frijol, a una profundidad cercana a los 5 cms, se rigó con 200 ml de agua diariamente por 5 días hasta que germinan las plantas.

Una vez alcanzaron una altura de alrededor de 15 cms, lo que sucedió a los 10 días después de la germinación, se dió inicio a la experimentación con la



irrigación con 100 ml de lodo de perforación, simulando un derrame accidental, igualmente se continuó con el riego con agua simulando lluvia.

### 5.1.1.2 Observaciones

Las observaciones realizadas a las plantas de *phaseolus vulgaris* se resumen en la tablas 36 y 37, donde se presentan por cada una de las 10 plantas expuestas por cada tipo de fluido de perforación.

Tabla 36. Observaciones plantas de frijol ante derrame de OBM diesel y palma

	PLANTA	DIA 1			DIA 2			DIA 3			DIA 40		
		ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR
LODO BASE ACPM	1	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	marrón			
	2	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	marrón			
	3	15	3	verde	15	3	amarillo	15	3	marrón			
	4	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	marrón			
	5	15	3	verde	15	3	amarillo	15	3	marrón			
	6	15	3	verde	15	3	amarillo	15	3	marrón			
	7	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	marrón			
	8	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			
	9	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			
	10	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			
	PLANTA	DIA 1			DIA 2			DIA 3			DIA 40		
		ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR
LODO BASE ACEITE DE PALMA	1	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	amarillo			
	2	15	3	verde	15	3	marrón	15	3	marrón			
	3	15	3	verde	15	3	marrón	15	3	marrón			
	4	15	3	verde	15	3	amarillo	15	3	marrón			
	5	15	3	verde	15	3	amarillo	15	3	amarillo			
	6	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	amarillo			
	7	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			
	8	15	2	verde	15	2	amarillo	15	2	marrón			
	9	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			
	10	15	2	verde	15	2	marrón	15	2	marrón			

Una vez hecho el derrame accidental de 100 ml de lodo base aceite de palma y diesel, las plantas detuvieron su crecimiento y formación de hojas, tan solo 6 horas después las hojas empiezan a marchitarse y al tercer día se presenta la marchitez total de las plantas, ver figuras 49 y 50. Al remover las plantas ya deterioradas se observa que el suelo se encuentra impregnado del lodo base aceite prácticamente hasta el fondo de las macetas que es de aproximadamente de 30 cms.



Figura 49. Día 1 y día 3 de aplicación de OBM diesel a plantas de frijol



Figura 50. Día 1 y 3 de aplicación de OBM de palma a plantas de frijol

Tabla 37. Observaciones plantas de frijol ante derrame accidental de lodo base aceite de higuierilla y sin derrame

	PLANTA	DIA 1			DIA 2			DIA 3			DIA 40		
		ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR
LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA	1	15	2	verde	16	4	verde	17	10	verde	60	25	verde
	2	15	2	verde	15	4	verde	16	10	verde	56	26	verde
	3	15	2	verde	18	4	verde	20	10	verde	58	24	verde
	4	15	2	verde	15	4	verde	16	8	verde	59	22	verde
	5	15	2	verde	15	4	verde	16	8	verde	48	23	verde
	6	15	2	verde	16	4	verde	17	8	verde	60	26	verde
	7	15	3	verde	16	4	verde	18	8	verde	61	24	verde
	8	15	3	verde	16	4	verde	18	6	verde	50	24	verde
	9	15	2	verde	17	4	verde	18	8	verde	46	20	verde
	10	15	2	verde	17	4	verde	19	8	verde	48	20	verde
SIN CONTAMINAR		DIA 1			DIA 2			DIA 3			DIA 40		
		ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR
	3	15	2	verde	15	6	verde	17	8	verde	59	28	verde
	4	15	3	verde	15	6	verde	16	8	verde	50	25	verde
	5	15	3	verde	15	5	verde	16	8	verde	56	25	verde
	6	15	3	verde	17	5	verde	18	8	verde	61	25	verde
	7	15	3	verde	16	4	verde	18	6	verde	60	24	verde
	8	15	2	verde	18	4	verde	19	6	verde	49	24	verde
9	15	2	verde	17	4	verde	19	6	verde	54	24	verde	
10	15	2	verde	18	4	verde	19	6	verde	56	24	verde	

Una vez hecho el derrame accidental de 100 ml de lodo base aceite de higuierilla y mantener las plantas sin contaminar, no se observa variaciones y el crecimiento se hace bajo los estándares normales de las plantas de frijol, es decir crecimiento por 35 a 40 días de alturas de más de 50 cms, con abundantes hojas y conservaron su coloración verde de tallo y hojas, como se observa en la figura 51. Al haber hecho la observación de los suelos de las

plantas expuestas a los lodos base aceite diesel y de palma, se toma la decisión de observar qué ha sucedido con los suelos del lodo base aceite de higuera y se encuentra que la sensación grasosa solo ha descendido hasta la mitad de la maceta cuando más.



Figura 51. Día 1 y 3 de aplicación de OBM de higuera a plantas de frijol

El crecimiento de las plantas se muestra en la figura 52, en tanto que el follaje, representado en el número de hojas, se muestra en la figura 53.

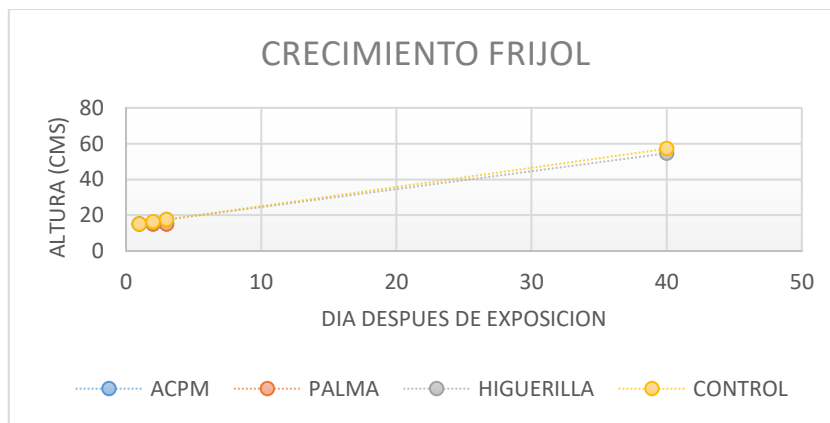


Figura 52. Crecimiento de planta de frijol después de exposición a los lodos

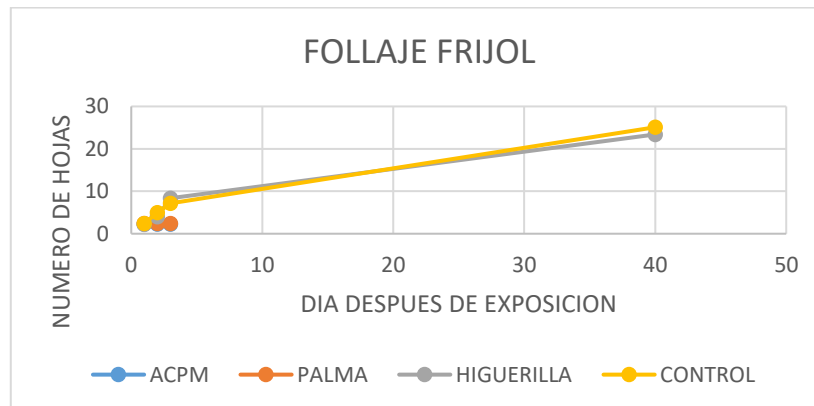


Figura 53. Número de hojas planta de frijol después de exposición a los lodos

### 5.1.2 Comportamiento de la *swinglea glutinosa* – limoncillo

Se presenta inicialmente como se realizó la preparación del suelo, siembra y actividades preliminares, para posteriormente presentar las observaciones hechas.

#### 5.1.2.1 Preparación, siembra y acciones preliminares

Se prepararon 40 macetas con suelos de la finca la bonita, abono ceagrodex (ver anexo E) y cascarilla de arroz en relación 56:24:20 respectivamente, para tener las condiciones recomendadas para su crecimiento. Se trasplantaron plántulas de 10 centímetros adquiridas en vivero, cuidando mantener la raíz lo más recta posible y haciendo todo el procedimiento bajo sombra. Luego de dos semanas de siembra, se sacaron a la luz progresivamente, con riego diario matutino hasta alcanzar los 25 centímetros de altura promedio de las plantas, cabe anotar que algunas plantas alcanzaron en este periodo de tiempo altura hasta de 30 centímetros. A partir de este momento se realiza la exposición a los lodos en análisis, con el riego de 100 ml de lodo, simulando un derrame accidental, para posteriormente continuar con riego matutino de agua, evitando que se formen encharcamientos y se realizan las observaciones pertinentes.



Figura 54. Establecimiento de las plantas de *swinglea*

En las tablas 38 y 39, se presenta el resumen del crecimiento (en centímetros), de los grupos de 10 plantas expuestas al derrame de los diferentes fluidos de perforación base aceite que fueron probados. En la tabla 38 se muestran las observaciones de las plantas expuestas a lodo base aceite diesel y de palma, en tanto que en la tabla 39 se presentan las observaciones de las plantas expuestas al lodo base aceite de higuera y las plantas sin exposición.

Tabla 38. Crecimiento en centímetros de plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma

	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
LODO BASE ACPM	1	27,3	27,3	27,5	27,6	27,8	27,9	28,0	28,1	28,3	28,6	28,7	28,9	29,0	29,3	29,5
	2	31,8	32,2	32,6	32,8	33,2	33,9	34,3	34,8	35,1	35,4	35,7	36,2	36,6	37,0	37,5
	3	28,9	29,1	29,4	29,9	30,3	30,9	31,7	31,9	32,5	33,0	33,6	33,9	34,2	34,8	35,0
	4	32,2	32,8	33,0	33,6	34,1	34,8	35,1	35,6	35,9	36,4	37,1	37,9	38,5	39,0	39,5
	5	27,5	27,5	27,7	27,8	28,0	28,1	28,2	28,3	28,5	28,8	28,9	29,1	29,2	29,5	29,7
	6	32,0	32,4	32,8	33,0	33,4	34,1	34,5	35,0	35,3	35,6	35,9	36,4	36,8	37,2	37,7
	7	31,6	32,0	32,4	32,6	33,0	33,7	34,1	34,6	34,9	35,2	35,5	36,0	36,4	36,8	37,3
	8	27,4	27,4	27,6	27,7	27,9	28,0	28,1	28,2	28,4	28,7	28,8	29,0	29,1	29,4	29,6
	9	27,0	27,0	27,2	27,3	27,5	27,6	27,7	27,8	28,0	28,3	28,4	28,6	28,7	29,0	29,2
	10	32,4	33,0	33,2	33,8	34,3	35,0	35,3	35,8	36,1	36,6	37,3	38,1	38,7	39,2	39,7
	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
LODO BASE ACEITE DE PALMA	1	27,8	28,2	28,5	28,8	29,1	29,6	30,1	30,8	31,4	31,9	32,5	32,9	33,4	33,9	34,6
	2	29,4	29,9	30,6	31,2	31,9	32,8	33,9	34,8	35,5	36,1	36,7	37,3	36,6	36,9	37,2
	3	27,2	27,4	27,5	27,6	27,8	27,8	28,0	28,1	28,3	28,5	28,7	28,9	29,0	29,1	29,2
	4	32,6	32,8	33,0	33,4	33,7	34,1	34,4	34,8	35,0	35,1	35,2	35,2	35,3	35,3	35,3
	5	27,9	28,3	28,6	28,9	29,2	29,7	30,2	30,9	31,5	32,0	32,6	33,0	33,5	34,0	34,7
	6	29,2	29,7	30,4	31,0	31,7	32,6	33,7	34,6	35,3	35,9	36,5	37,1	36,4	36,7	37,0
	7	28,0	28,4	28,7	29,0	29,3	29,8	30,3	31,0	31,6	32,1	32,7	33,1	33,6	34,1	34,8
	8	29,8	30,3	31,0	31,6	32,3	33,2	34,3	35,2	35,9	36,5	37,1	37,7	37,0	37,3	37,6
	9	32,3	32,5	32,7	33,1	33,4	33,8	34,1	34,5	34,7	34,8	34,9	34,9	35,0	35,0	35,0
	10	32,5	32,7	32,9	33,3	33,6	34,0	34,3	34,7	34,9	35,0	35,1	35,1	35,2	35,2	35,2

El crecimiento de las plantas se ve afectado al aplicar los OBM de diesel y palma, viéndose una menor tasa de crecimiento para el limoncillo expuesto al aceite de palma.

Tabla 39. Crecimiento en centímetros de las plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuerrilla y sin contaminar

	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA	1	28,9	29,4	29,9	30,6	31,2	31,8	32,5	33,3	34,0	34,8	35,7	36,7	37,8	39,0	40,0
	2	31,7	32,4	32,8	33,0	33,5	33,9	34,2	34,6	35,9	37,2	38,5	39,8	41,1	42,4	43,5
	3	29,1	29,2	29,2	29,4	29,5	29,7	29,8	29,8	30,9	31,9	33,0	34,0	35,1	36,1	37,2
	4	30,3	30,5	30,6	30,8	30,9	31,1	31,2	31,3	32,2	33,0	33,9	34,7	35,6	36,4	37,3
	5	29,0	29,5	30,0	30,7	31,3	31,9	32,6	33,4	34,1	34,9	35,8	36,8	37,9	39,1	40,1
	6	31,5	32,2	32,6	32,8	33,3	33,7	34,0	34,4	35,7	37,0	38,3	39,6	40,9	42,2	43,3
	7	29,1	29,6	30,1	30,8	31,4	32,0	32,7	33,5	34,2	35,0	35,9	36,9	38,0	39,2	40,2
	8	32,1	32,8	33,2	33,4	33,9	34,3	34,6	35,0	36,3	37,6	38,9	40,2	41,5	42,8	43,9
	9	30,0	30,2	30,3	30,5	30,6	30,8	30,9	31,0	31,9	32,7	33,6	34,4	35,3	36,1	37,0
	10	30,2	30,4	30,5	30,7	30,8	31,0	31,1	31,2	32,1	32,9	33,8	34,6	35,5	36,3	37,2
	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
SIN CONTAMINAR	1	30,1	30,3	30,8	31,3	31,9	32,6	32,9	33,2	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0
	2	32,2	32,5	32,7	32,9	33,2	33,4	33,5	33,7	35,0	36,3	37,6	38,9	40,2	41,5	42,8
	3	24,2	24,5	24,6	24,8	25,1	25,3	25,6	25,8	26,9	27,9	29,0	30,0	31,1	32,1	33,2
	4	33,6	33,9	34,4	34,9	35,4	35,8	36,2	36,7	37,6	38,4	39,3	40,1	41,0	41,8	42,7
	5	30,2	30,4	30,9	31,4	32,0	32,7	33,0	33,3	34,1	35,1	36,1	37,1	38,1	39,1	40,1
	6	32,0	32,3	32,5	32,7	33,0	33,2	33,3	33,5	34,8	36,1	37,4	38,7	40,0	41,3	42,6
	7	30,3	30,5	31,0	31,5	32,1	32,8	33,1	33,4	34,2	35,2	36,2	37,2	38,2	39,2	40,2
	8	32,6	32,9	33,1	33,3	33,6	33,8	33,9	34,1	35,4	36,7	38,0	39,3	40,6	41,9	43,2
	9	33,3	33,6	34,1	34,6	35,1	35,5	35,9	36,4	37,3	38,1	39,0	39,8	40,7	41,5	42,4
	10	33,5	33,8	34,3	34,8	35,3	35,7	36,1	36,6	37,5	38,3	39,2	40,0	40,9	41,7	42,6

La tasa de crecimiento de las plantas de limoncillo expuestas al OBM de aceite de higuerrilla se ve afectada respecto a las plantas sin contaminar, pero es mucho menor la afectación si se compara con el crecimiento de las plantas expuestas a los otros OBM, como se aprecia de mejor manera en la figura 55.

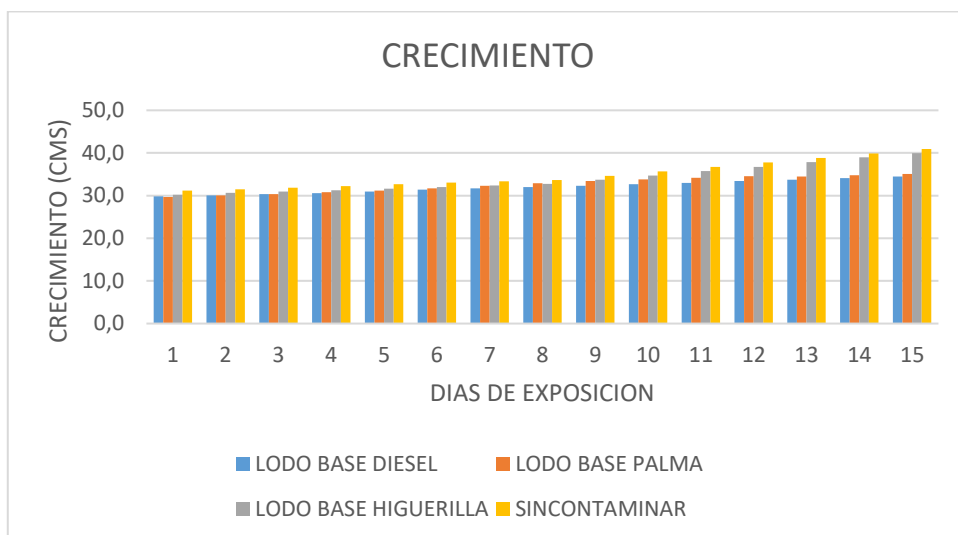


Figura 55. Crecimiento limoncillo después de exposición a los lodos

Paralelo a la medición del crecimiento de las plantas se hace el conteo de hojas, como se presenta en las tablas 40 y 41:

Tabla 40. Follaje plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma

		DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	
LODO ACPM	BASE	1	37	37	36	35	19	15	14	14	13	11	9	8	6	5	3
	2	35	35	35	34	31	31	30	30	29	28	27	25	23	20	17	
	3	33	33	32	32	25	24	22	22	21	20	18	17	15	14	11	
	4	32	32	32	31	28	28	27	27	26	24	23	21	18	16	13	
	5	33	33	32	32	25	24	22	22	21	20	18	17	15	14	11	
	6	32	32	32	31	28	28	27	27	26	24	23	21	18	16	13	
	7	36	36	35	34	18	14	13	13	12	10	8	7	5	4	2	
	8	36	36	36	35	32	32	31	31	30	29	28	26	24	21	18	
	9	32	32	32	31	28	28	27	27	26	24	23	21	18	16	13	
	10	35	35	34	33	17	13	12	12	11	9	7	6	4	3	1	
PLANTA		DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	
LODO ACEITE PALMA	BASE	1	18	18	18	18	17	17	16	15	14	12	11	9	8	6	3
	2	26	26	26	25	25	25	24	24	23	21	20	18	17	16	15	
	3	29	29	27	27	20	16	16	15	15	14	13	12	10	7	4	
	4	28	28	27	27	21	18	18	18	17	15	13	11	8	6	2	
	5	29	29	27	27	20	16	16	15	15	14	13	12	10	7	4	
	6	28	28	27	27	21	18	18	18	17	15	13	11	8	6	2	
	7	17	17	17	17	16	16	15	14	13	11	10	8	7	5	2	
	8	27	27	27	26	26	26	25	25	24	22	21	19	18	17	16	
	9	28	28	27	27	21	18	18	18	17	15	13	11	8	6	2	
	10	16	16	16	16	15	15	14	13	12	10	9	7	6	4	1	

Tabla 41. Follaje plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuierilla y sin contaminar

	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA	1	26	26	27	27	27	28	28	28	29	29	30	32	33	33	34
	2	34	34	35	35	36	37	38	38	38	39	41	41	42	43	45
	3	32	32	32	32	32	32	32	32	33	34	36	36	38	38	39
	4	18	18	18	19	19	20	20	20	21	21	23	24	25	26	28
	5	32	32	32	32	32	32	32	32	33	34	36	36	38	38	39
	6	18	18	18	19	19	20	20	20	21	21	23	24	25	26	28
	7	25	25	26	26	26	27	27	27	28	28	29	31	32	32	33
	8	35	35	36	36	37	38	39	39	39	40	42	42	43	44	46
	9	18	18	18	19	19	20	20	20	21	21	23	24	25	26	28
	10	24	24	25	25	25	26	26	26	27	27	28	30	31	31	32
	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
SIN CONTAMINAR	1	33	34	34	35	37	38	39	39	40	40	41	41	41	43	43
	2	39	39	40	41	41	42	42	42	43	43	45	45	45	46	47
	3	22	23	24	24	25	26	26	27	27	27	29	30	31	32	35
	4	33	34	35	37	37	39	39	40	40	41	42	43	43	44	45
	5	22	23	24	24	25	26	26	27	27	27	29	30	31	32	35
	6	33	34	35	37	37	39	39	40	40	41	42	43	43	44	45
	7	32	33	33	34	36	37	38	38	39	39	40	40	40	42	42
	8	40	40	41	42	42	43	43	43	44	44	46	46	46	47	48
	9	33	34	35	37	37	39	39	40	40	41	42	43	43	44	45
	10	31	32	32	33	35	36	37	37	38	38	39	39	39	41	41

Paralelo a los problemas de crecimiento de las plantas al ser expuestas a los OBM, se aprecia una gran influencia en el número de hojas, siendo marcadamente negativa para las expuestas a los lodos base aceite de palma y diesel y en mucha menor cuantía para las plantas afectadas con lodo base aceite de higuierilla, como puede verse en la figura 56.

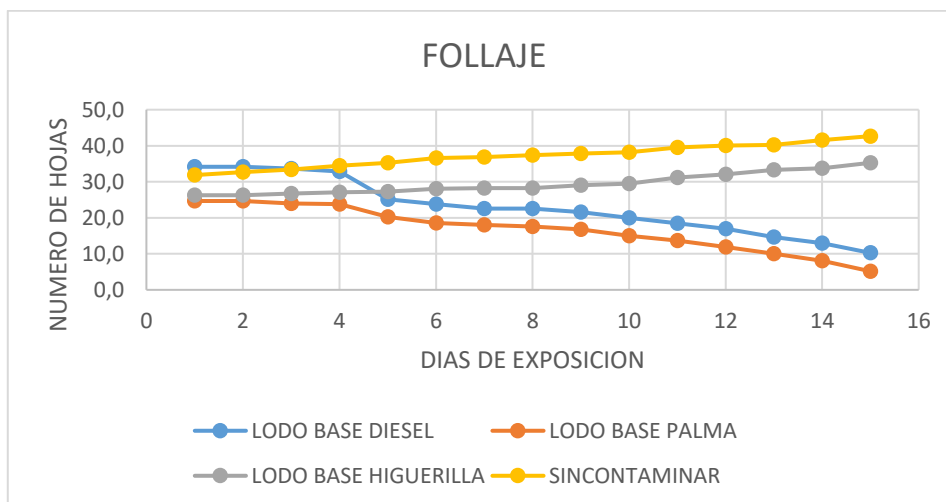









Figura 56. Crecimiento limoncillo después de exposición a los lodos

El desarrollo de las plantas en cuanto a crecimiento y número de hojas, se complementa con la observación de la coloración de hojas durante el tiempo

de análisis, para lo cual se estableció un código de color, que se presenta en la tabla 42.

Tabla 42. Código de color de hojas de Limoncillo

VO	VC	VA	M
Verde oscuro	Verde claro	Verde amarillo	Marrón
			
VOA	VCA	A	
Verde oscuro amarillo	Verde claro amarillo	Amarillo	
			

Con base en esta clasificación se hace la descripción del color general de las hojas de las plantas, presentadas en las tablas 43 y 44.

Tabla 43. Coloración hojas plantas de limoncillo ante derrame de OBM diesel y palma

		DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	
LODO ACPM	BASE	1	VO	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	A	
		2	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	A	
		3	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	
		4	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	
		5	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	
		6	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	
		7	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	
		8	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	
		9	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	A	A	A	
		10	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	
LODO ACEITE PALMA	BASE	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15
		1	VO	VOA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	M	M	
		2	VC	VC	VC	VC	VA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	M	
		3	VO	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	
		4	VO	VO	VOA	VCA	VCA	VCA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	
		5	VO	VO	VOA	VOA	VCA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	
		6	VO	VO	VO	VOA	VCA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	
		7	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	M	M
		8	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	A
		9	VO	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	A
	10	VO	VOA	VOA	VOA	VA	VA	VA	VA	A	A	A	A	A	A	A	



Tabla 44. Coloración hojas plantas de limoncillo ante derrame de OBM higuerrilla y sin contaminar

	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	
LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA	1	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	
	2	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	
	3	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA	VCA	VCA	
	4	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VCA	VCA	VCA	VCA	VCA	
	5	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	
	6	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA
	7	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	
	8	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA	VCA
	9	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA	VCA
	10	VO	VO	VO	VO	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VOA	VCA	VCA	VCA	VCA	
	PLANTA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	
SIN CONTAMINAR	1	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	2	VCA	VCA	VCA	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	3	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	4	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	5	VOA	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	6	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	7	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	8	VC	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	
	9	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VO	VO	VO	
	10	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	

De igual forma que lo observado con la afectación en crecimiento y en follaje, la coloración de las hojas evidencia el deterioro de las plantas al ser expuestas principalmente al OBM base diesel y aceite de palma, en menor grado a las expuestas a OBM base aceite de higuerrilla.

### 5.1.3 Comportamiento de la *Tebebuia rosea* - Ocobo expuesto

Se presenta inicialmente como se realizó la preparación del suelo, siembra y actividades preliminares, para posteriormente presentar las observaciones hechas.

#### 5.1.3.1 Preparación, siembra y acciones preliminares

Esta etapa de la investigación se centra en la descripción del crecimiento y follaje del ocobo al exponerse a contaminación con 100 ml de lodo base aceite (diesel, higuerrilla y palma). Inicialmente se compra en vivero pequeñas plantas de un poco menos de 10 centímetros con alrededor de 6 hojas, aproximadamente 30 días de siembra, pero al trasplantar a macetas, la manipulación afecta las plantas ocasionando que se secan. Se siguió la recomendación del ing agrónomo Felipe Bermúdez, dueño de vivero, de comprar las plantas de aproximadamente 25 centímetros, es decir de 120 días de siembra, sin realizar cambio de bolsa, simplemente la contaminación y

observación se realiza en las bolsas de vivero y a una muestra de 20 plantas, se mide el pH del suelo y se encuentra en 6,8, lo cual es óptimo para estas plantas. Ver figura 57



Figura 57. *Tebebuia rosea* de 25 cms para iniciar la experimentación y en crecimiento

### 5.1.3.2 Observaciones

En la tabla 45 y figura 58, se relacionan las observaciones hechas, es importante anotar que por la baja tasa de crecimiento de los ocobos, fue muy difícil determinar si había afectación, pero el follaje y la coloración de las plantas si es un indicativo.

Tabla 45. Observaciones de los ocobos al ser expuestos a derrame accidental

	PLANTA	DIA 1			DIA 15			DIA 30			DIA 60			DIA 120		
		ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR	ALTURA (cms)	FOLLAJE (# hojas)	COLOR
LODO BASE ACPM	1	25,0	13	verde	26,4	14	verde	27,8	16	amarillo	28,8	17	verde	30,6	19	amarillo
	2	26,0	14	verde	27,3	15	verde	28,7	17	amarillo	29,7	18	verde	31,5	20	amarillo
	3	27,0	14	verde	28,5	16	verde	29,9	17	amarillo	30,9	18	verde	32,7	20	amarillo
	4	28,0	15	verde	29,1	16	verde	30,5	18	amarillo	31,5	19	verde	33,3	20	amarillo
	5	32,0	20	verde	33,3	21	verde	34,7	23	amarillo	35,7	24	verde	37,5	26	amarillo
LODO BASE ACEITE DE PALMA	1	25,2	14	verde	26,0	15	verde	27,3	16	amarillo	28,1	17	verde	29,1	18	amarillo
	2	26,1	16	verde	26,8	17	verde	28,1	18	amarillo	28,9	19	verde	29,9	20	amarillo
	3	28,3	16	verde	29,2	17	verde	30,5	18	amarillo	31,3	19	verde	32,3	20	amarillo
	4	29,0	20	verde	29,8	21	verde	31,1	22	amarillo	31,9	23	verde	32,9	24	amarillo
	5	33,4	23	verde	33,7	23	verde	35,0	25	amarillo	35,8	25	verde	36,8	26	amarillo
LODO BASE ACEITE DE HIGUERILLA	2	26,2	13	verde	30,3	17	verde	33,6	20	verde	34,6	21	verde	35,6	22	verde
	3	28,5	15	verde	31,8	18	verde	35,1	22	verde	36,1	23	verde	37,1	24	amarillo
	4	32,0	19	verde	37,8	25	verde	41,1	28	verde	42,1	29	verde	43,1	30	amarillo
	5	30,5	21	verde	33,2	24	verde	36,5	27	verde	37,5	28	verde	38,5	29	verde
	3	24,2	15	verde	28,1	19	verde	32,0	23	verde	34,3	25	verde	37,8	29	verde
SIN CONTAMINAR	4	25,5	15	verde	30,4	20	verde	34,3	24	verde	36,6	26	verde	40,1	30	verde
	5	35,8	22	verde	38,7	25	verde	42,6	29	verde	44,9	31	verde	48,4	35	verde
	6	33,1	21	verde	35,0	23	verde	38,9	27	verde	41,2	29	verde	44,7	33	verde
	7	30,1	21	verde	34,0	25	verde	37,9	29	verde	40,2	31	verde	43,7	35	verde

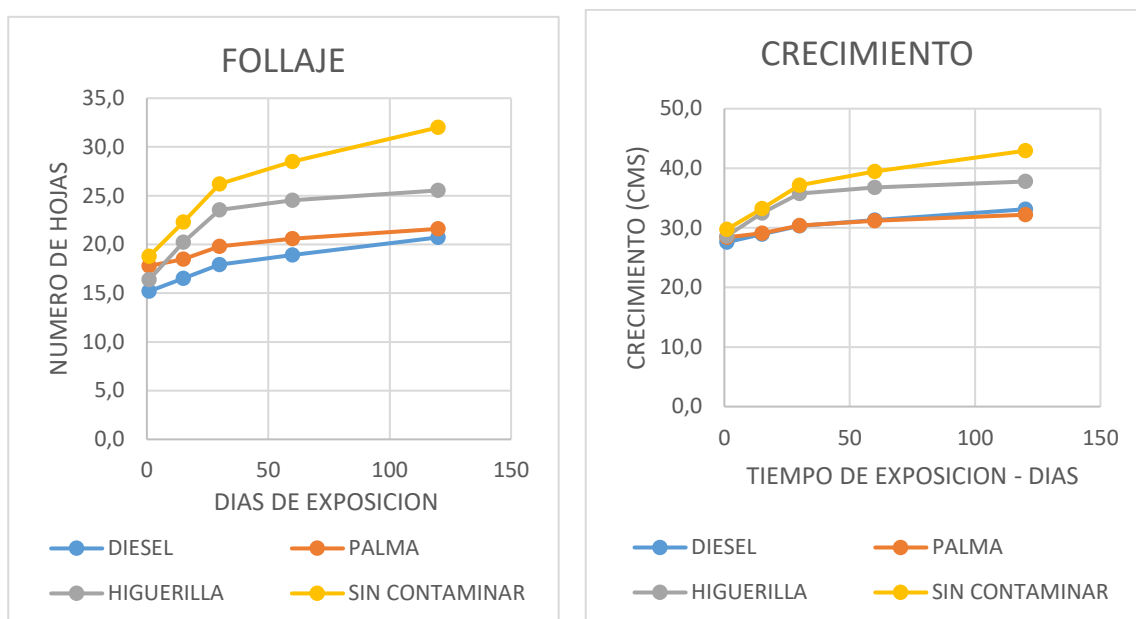


Figura 58. Variación de crecimiento y follaje de los ocobos expuestos a derrame accidental

En la figura 58, se observa claramente que en todos los casos las plantas presentan afectación debida al derrame del lodo base aceite, siendo más fuerte con los base diesel y palma y en menor cuantía con el base higuierilla. Existe una hipótesis de que el aceite recubre las raíces aislándolas de su entorno e impidiendo que pueda absorber nutrientes y agua, minimizando el crecimiento en altura como en follaje y provocando el amarillamiento de las hojas debido al deterioro del proceso de fotosíntesis. Es conveniente ampliar los estudios para determinar si esta hipótesis es válida.

## 5.2 COMPORTAMIENTO DE *oreochromis niloticus* (MOJARRA ROJA)

### 5.2.1 Preparación del ensayo

Estas pruebas se realizan con el fin de establecer y comparar el impacto que puede llegar a tener el lodo de perforación base aceite vegetal de higuierilla en un ecosistema acuático, teniendo como referencia un indicador biológico. Y a su vez comparar el comportamiento de dicho indicador biológico frente a la exposición de lodos base aceite diesel y de palma. En este caso se usan alevinos del pez tilapia perteneciente a la familia *cichlidae* debido a la facilidad de obtención y supervivencia de este pez en regiones tropicales y la afectación se evalúa con el registro de mortalidad vs concentración del lodo contaminante. Esto se hizo con el fin de determinar la LC50 o concentración letal a la que mueren el 50% de los sujetos de prueba ya que esta es la medida necesaria para clasificar la toxicidad de una sustancia.



Figura 59. Compra de alevinos piscícola de Ing Rodríguez

Los alevinos usados corresponden a individuos obtenidos en un criadero de Neiva (propiedad Ing Jairo Rodríguez), de 30 días de vida, ver figura 59, que ya han desarrollado su sistema respiratorio y se alimentan de comida sólida por si solos.

Se prepara 4 acuarios de prueba, un acuario de recuperación de sobrevivientes y un acuario primario, ver figura 60, donde permanecen los alevinos antes del ensayo, la idea es no mezclar los sobrevivientes con los no expuestos, para evitar que un mismo individuo se exponga varias veces. Estos acuarios se ubican en el laboratorio de fluidos de la Universidad Surcolombiana.



Figura 60. Acuario principal, alevinos antes de ensayos.

Los acuarios se dotan de un termostato para mantener la temperatura entre 28 y 32°C, óptima para los peces, adicionalmente se coloca un sistema de

aireación inducida, que permita mantener los niveles de oxígeno adecuados (mayor a 4 mg/L). El agua utilizada en todos los acuarios proviene de la quebrada la raya, ver figura 61, ubicada a las afueras de la ciudad de Neiva, tributaria de la quebrada Quisinde, en el sector conocido como vereda Quisinde de Santa Clara; buscando simular condiciones naturales de derrame.



Figura 61. Quebrada La Raya. Sitio de captación de agua

La caracterización del agua de la quebrada La Raya y su comparación con los parámetros óptimos para la cría de mojarra, se presenta en la tabla 46.

Tabla 46. Caracterización del agua de la quebrada La Raya.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>RANGOS ÓPTIMOS</b> Fuente: Nicovita	<b>Q. LA RAYA</b> Fuente lab criadero
Oxígeno	> 4 mg/L	> 6 mg/L
Temperatura	28 °C – 32 °C	26 °C
Dureza	50 – 350 ppm	250 ppm
Alcalinidad	100 – 200 ppm	150 ppm
Ph	6.5 - 9	7,5
Amonio	< 2 ppm	< 1 ppm
Nitritos	< 0.1 ppm	ND
Dióxido de carbono	< 20 ppm	< 10 ppm
Sulfuro de hidrógeno	< 10 ppm	ND
Ácido cianhídrico	< 10 ppm	ND
Gas metano	< 25 ppm	ND
Sólidos en suspensión	< 100 mg/L	45 mg/L
Fosfatos	0.6 ppm – 1.5 ppm	0.9 ppm
Cloruros	< 10 ppm	6 ppm
Sulfatos	< 18 ppm	10 ppm

Los alevines son entonces aclimatados, para minimizar el estrés, para lo cual se introduce el recipiente de viaje de los peces en el acuario principal donde poco a poco se equilibran las temperaturas y se va mezclando el agua de transporte con el agua de prueba. Se da una semana de residencia antes de

comenzar las pruebas, teniendo cuidado de controlar los parámetros una vez por semana, excepto el pH que se valora diariamente, ver figura 62.



Figura 62. Medición de pH

### 5.2.2 Comportamiento de *oreochromis niloticus* ante ensayo 96LC50

Cada concentración analizada se prueba para 10 individuos por acuario. Se realizaron ensayos desde 50 ppm sin observar afectación de los individuos hasta una concentración de lodo de perforación base aceite de 600 ppm, a partir de esta concentración se procede a aumentar la concentración a 1000 ppm de lodo donde no se observa afectación, posteriormente a 2000 ppm y de igual manera no se logró determinar la concentración letal. Posteriormente se hizo el ensayo a 5000 ppm de concentración de cada uno de los lodos de perforación, pudiéndose obtener la concentración letal para el 50% de los individuos en el fluido base aceite diesel, por lo que se probó con concentraciones entre 4500 y 5000 ppm, sin que se presentara datos significativos. Las concentraciones donde se observa cambio en la afectación de los individuos se muestran en la tabla 47.

Tabla 47. Comportamiento de exposición a OBM de los alevines de tilapia roja

CONCENTRACION DE LODO	400 PPM		600 PPM		1000 PPM		2000 PPM		5000 PPM	
	INDIVIDUOS FALLECIDOS		INDIVIDUOS FALLECIDOS		INDIVIDUOS FALLECIDOS		INDIVIDUOS FALLECIDOS		INDIVIDUOS FALLECIDOS	
LODO BASE ACEITE	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
SIN CONTAMINAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DIESEL	0	0	1	10	2	20	3	30	5	50
PALMA	0	0	1	10	1	10	2	20	5	50
HIGUERILLA	0	0	0	0	1	10	1	10	5	50

Para la contaminación con concentración de 400 ppm, no hubo individuos afectados, se siguió con un aumento del 50% en la concentración y se observó que para el lodo base diesel, se ve afectado un individuo a las 48 horas y para

el lodo base palma también se afecta un individuo a las 72 horas, por lo que se procedió a aumentar nuevamente la concentración buscando afectar el 50% de la población de alevinos expuesta.

Se incrementó entonces la contaminación a 1000 ppm, lo cual aumenta el porcentaje de afectación al 20% de individuos para el diesel a las 48 horas, para el lodo base aceite de palma del 10% de los individuos a las 48 horas y para el lodo base aceite de higuera del 10% a las 72 horas.

Al incrementar la concentración de lodo en cada acuario a 2000 ppm, para el lodo base diesel se presentó afectación del 30% de los individuos, uno a las 8 horas, otro a las 24 horas y el último a las 96 horas; para el base palma, la incidencia fue del 20%, un individuo a las 8 horas y otro a las 48 horas; para el base higuera se presentó una incidencia del 10% a las 48 horas.

Se incrementó entonces la concentración a 5000 ppm, obteniendo que para el lodo base diesel, la afectación es del 50%, presentándose afectación a un individuo a las 8 horas, otro a las 24 horas, dos a las 48 horas y uno más a las 72 horas; para el base palma, se presentó afectación de un individuo a las 8 horas, otro a las 48 horas, otros dos a las 72 horas y uno más a las 96 horas; y finalmente para el lodo base aceite de higuera (ver pecera en la figura 64), se afectó a un individuo a las 8 horas, dos más a las 48 horas, uno más a las 72 horas y finalmente uno más a las 96 horas. El registro se llevó como se observa en la figura 63.



Figura 63. Caracterización de peces fallecidos en ensayos

Con esta última contaminación se logra obtener la concentración letal a la que mueren el 50% de los peces o LC50, medida necesaria para determinar la toxicidad de una sustancia según la escala Hodge y Sterner.

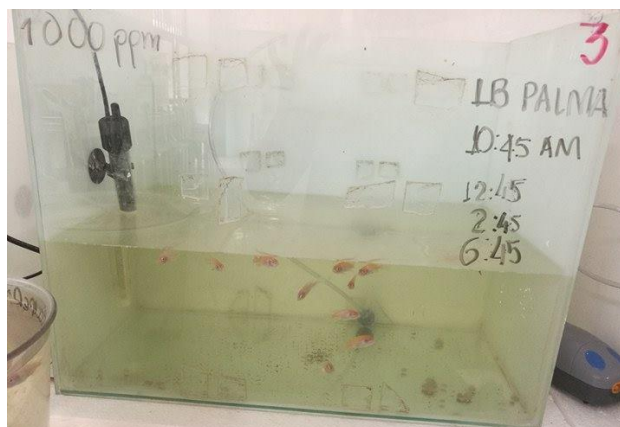


Figura 64. Pecera contaminada con lodo base aceite de higuierilla

Cabe destacar un suceso especial y es que mientras los lodos base aceite diesel y aceite de palma, estos se mantienen en la superficie del agua, los lodos base aceite de higuierilla forman aglomeraciones esféricas cuya densidad hace que vayan al fondo del acuario, los peces sienten interés y permanecen cerca y buscan comerlos. Otra apreciación, es que los peces expuestos a higuierilla presentan diarrea y pérdida de colores, esto último se presenta para todos los acuarios contaminados.

En la tabla 48, se presenta la clasificación de la toxicidad de cada uno de los lodos según Hodge y Sterner:

Tabla 48. Clasificación toxicológica de los lodos según Hodge y Sterner.

SUSTANCIA CONTAMINANTE	LC50 (ppm)	CLASIFICACION DE TOXICIDAD (Hodge y Sterner)
Lodo base ACPM	5000 (72 horas)	4 (ligeramente tóxico)
Lodo base aceite de palma	5000 (96 horas)	4 (ligeramente tóxico)
Lodo base aceite de higuierilla	5000 (96 horas)	4 (ligeramente tóxico)

A pesar de que los tres lodos poseen la misma clasificación toxicológica cabe resaltar que el tiempo de afectación es menor para el diesel (72LC50), mientras que para los lodos bases aceites vegetales como palma e higuierilla, la afectación se dio a las 96 horas.

### 5.3 DEGRADABILIDAD DE LOS SUELOS EXPUESTOS A CONTAMINACION

#### 5.3.1 Preparación del ensayo

Para el montaje de las eras de evaluación se procedió a la toma de suelos aledaños al mismo cuerpo de agua de donde se tomó para los ensayos con los alevines de *oreochromis niloticus* - tilapia roja, buscando conservar homogeneidad del escenario, ver figura 65.





Figura 65. Zona de extracción del suelo, Finca La Bonita.

La extracción del suelo se realizó según las normas presentadas por el laboratorio de suelos de la Universidad Surcolombiana (Instructivo para la extracción de suelos, LABGAA), realizando diversas tomas distantes una de otras a los primeros 20 cm de profundidad para después mezclar homogéneamente.

Se homogenizaron las muestras y se distribuyeron en materas amplias para ser tomadas como eras de tratamiento, utilizando humus, ver figura 66, como agente biorremediador, estableciendo una era de control y las eras contaminadas con los diferentes lodos base aceite y las eras a las cuales se les aplica tratamiento, para un total de 7 eras.



Figura 66. Humus líquido y muestra agregada a cada recipiente

Con base en el artículo publicado en *Journal of Environmental Management*, llamado "Bioremediation of a tropical clay soil contaminated with diesel oil", las dimensiones de los recipientes son de 15x20x45 cm, con 5kg de suelo cada una y con una proporción de contaminantes que va desde 40 gr por cada kg de suelo hasta 150 gr por cada kilogramo de suelo (Barahona *et al.*, 2004). En el proyecto se toma como medida, 120gr por cada kilogramo de suelo, es decir un total de 600 gr de contaminante en cada recipiente, ver figura 67. De igual manera se aplica el producto orgánico durante 5 días en dosis constante de 200 gr.

Debido a que en la cadena de degradación de hidrocarburos se necesita la presencia de oxígeno, se implementó un sistema manual de aireación al suelo mediante la instalación de tubos de PVC que permitieran un mayor contacto de oxígeno con los microorganismos del humus que remediaban el suelo y se apoya adicionalmente con el volteo manual diario de cada era.



Figura 67. Montaje para aplicación de humus y entrada de oxígeno

Se hizo la caracterización del suelo en el laboratorio de suelos de la Universidad Surcolombiana, cuyos resultados se muestran en la tabla 49.

Tabla 49. Caracterización de los suelos a tratar

PARAMETRO	CONCENTRACION
Arena	38%
Limo	34%
Arcilla	28%
MO	0,1 mg/L
pH	8,3 mg/L
Ca	17,7 mg/L
Mg	4,53 mg/L
K	0,12 mg/L
Na	1,11 mg/L
P	56 mg/L
S	43 mg/L
Fe	0,3 mg/L
Cu	0,2 mg/L
B	0,4 mg/L

Como medida de control, se estableció la medición diaria de pH durante todo el tiempo de experimentación para mantenerlo en valores entre 6,5 y 8 que es lo recomendado por el productor del humus para su eficiente acción. Se observaron valores entre 8 y 9, por lo que se hace necesario la aplicación de sulfato de hierro para mantenerlo alrededor de 7.

### 5.3.2 Comportamiento de la concentración de TPH en el suelo

Para corroborar la degradación de hidrocarburos, se realizó la medición de porcentaje total de hidrocarburos (TPH) a todas las muestras de suelos. El proceso se ejecutó durante seis meses y se hizo muestreo mensual. Se aplicó la técnica gravimétrica modificada usando cloroformo como solvente orgánico. Adicionalmente se llevó a laboratorio externo de la ciudad de Bogotá (Chemilab) seis muestras para corroborar la efectividad tanto del tratamiento como del análisis. Los resultados de los valores obtenidos de TPH en suelos, se presentan en la tabla 50.

Tabla 50. Comportamiento de TPH en el suelo expuesto a contaminación

		TPH						CHEMILAB	
		DIA DE MUESTREO							
	LODO BASE ACEITE	1	30	60	90	120	150	180	
	SIN CONTAMINAR	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
SIN HUMUS	DIESEL	8,420	8,384	7,056	5,768	4,560	3,656	1,150	1,130
	PALMA	8,110	8,321	6,993	6,235	5,331	3,983	1,000	0,869
	HIGUERILLA	8,688	8,259	6,930	6,166	5,257	4,116	1,000	0,847
CON HUMUS	DIESEL*	8,420	7,770	6,539	5,346	4,226	3,101	1,000	0,987
	PALMA*	8,110	7,712	6,481	5,288	4,168	3,043	ND	0,590
	HIGUERILLA*	8,688	7,654	6,423	5,230	4,110	2,985	ND	0,517

Por el método gravimétrico se presentaron valores no detectables que pudieron ser corroborados a través de análisis espectrofotométrico (chemilab).

Los valores de disminución de TPH obtenidos al aplicar humus para tratar la contaminación de los suelos con los diferentes lodos base aceite analizados (diesel, palma e higuierilla), aireando y con un tiempo de espera de 180 días, se presentan en la tabla 51.

Tabla 51. Porcentaje de disminución de TPH

CONTAMINANTE	% DISMINUCIÓN DE TPH
Diésel	12,65
Higuierilla	38,96
Palma	32,10

Se presenta el decrecimiento de la concentración de TPH en suelos contaminados con los diferentes fluidos de perforación, sin tratamiento en la figura 68 y con tratamiento en la figura 69, teniendo como valores de referencia las concentraciones aceptadas por Protocolo de Louisiana 29 y API, de 3% y 1%, respectivamente. En la figura 70, se observa el comportamiento del TPH solo para el suelo contaminado con fluido base aceite de higuierilla, con y sin tratamiento con humus.

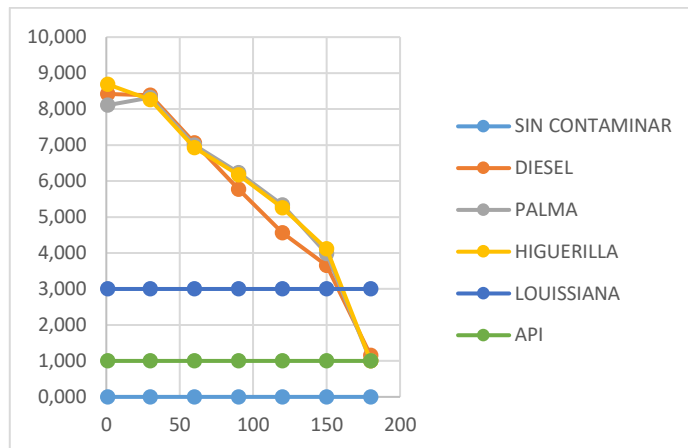


Figura 68. Disminución de TPH sin tratamiento

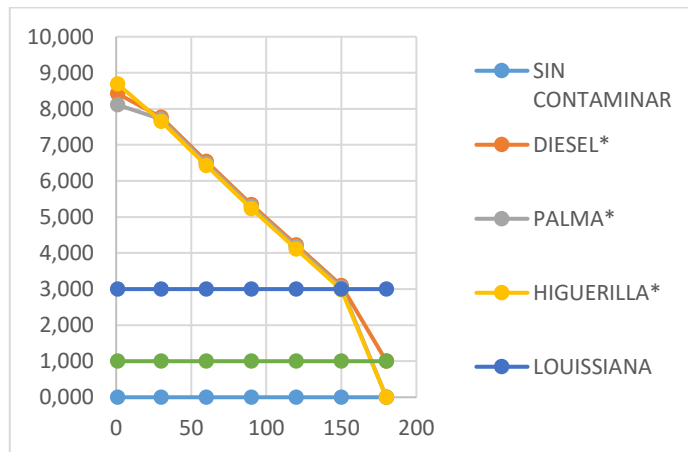


Figura 69. Disminución de TPH con tratamiento con humus

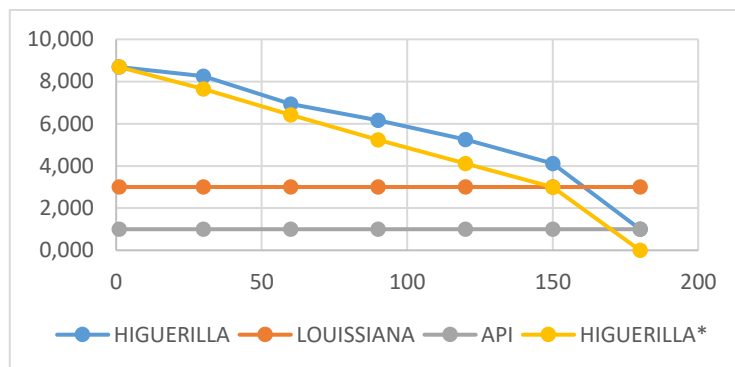


Figura 70. Disminución de TPH en suelos contaminados con lodo base aceite de higuierilla con y sin tratamiento

A los 6 meses de contaminación de los suelos, se observó remediación por hidrocarburos, independiente del tipo de lodo usado y de si se usa o no el tratamiento con humus. Se estima que después de los 5 meses se da

cumplimiento a los requerimientos de Louisiana y cerca a los 6 meses a los requerimientos de API.

No hay una gran desviación entre los valores de reducción de TPH para ninguno de los contaminantes empleados. Sin embargo, el proceso se hace más rápido para el suelo contaminado con aceite de higuera.

## 6. EVALUACION DE COSTOS AMBIENTALES

La evaluación de costos ambientales se centra en la determinación del valor económico del medio ambiente, siendo este la sumatoria de los valores presentes descontados de todos los flujos de bienes y servicios ofrecidos a la sociedad, considerando que en ciertas condiciones el descuento puede ser al infinito. Se tienen flujos de bienes y servicios directos e indirectos que pueden ser consumidos en el presente o en el futuro por una generación; y por otras generaciones.

Para efectos de esta investigación se hace necesaria la identificación de indicadores ambientales y a su vez asignar la valoración del costo ambiental para lo cual se usa un método indirecto (Método de los Precios Hedónicos), para posteriormente aplicar un método matemático que para el objeto de esta investigación es el método de mínimos cuadrados ordinales.

### 6.1 SELECCIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES

La selección de indicadores ambientales está enmarcada en los referentes aplicados en la investigación pues son los parámetros realmente medidos, usar otros parámetros sería entrar en supuestos.

#### 6.1.1 Indicadores de especies vegetales

Para las tres especies vegetales estudiadas: *swinglea glutinosa* - limoncillo, *tabebuia rosea* - ocobo y *phaseolus vulgaris* - frijol, expuestas al derrame accidental de lodos base aceite de higuera, diesel y aceite de palma, se establecen como indicadores la altura, el follaje, considerando el número de hojas y la apariencia, determinada por el color de las plantas.

#### 6.1.2 Indicadores de especie acuática

En este caso el indicador es el 96LC50 al exponer alevinos del pez *oreochromis niloticus* - tilapia. Como medida de la toxicidad para esta especie al exponerse a un derrame accidental de fluidos de perforación base aceite diesel, de palma y de higuera.

#### 6.1.3 Indicadores en suelos

Para los suelos el indicador es el porcentaje total de hidrocarburos (TPH) considerando su evolución con el tiempo hasta alcanzar el valor aceptable por Louisiana (3%) y/o API (1%), por el tiempo de prueba.

## 6.2 VALORACION DE COSTO AMBIENTAL

### 6.2.1 Asignación de valor a los indicadores

Para las especies vegetales, los indicadores se manejaron como se presenta en la tabla 52.

Tabla 52. Valoración de indicadores para especies vegetales

INDICADOR	VALORACION
ALTURA	Se asigna los valores medidos directamente, los cuales oscilan entre 15 y 30 cms para el frijol, entre 24 y 40 cms para la swinglia y entre 24 y 40 cms para el ocobo.
FOLLAJE	Se asigna los valores del número de hojas contado según el día de medición. Los valores oscilan entre 1 y 24 para el frijol, entre 1 y 40 para el limoncillo y entre 1 y 30 para el ocobo.
COLORACION	Se asigna un código de colores, que va entre 1 y 5, donde 1 es el valor para las hojas marchitas, 3 para las que empiezan el proceso de marchitez con amarillamiento y de 5 para las hojas verdes.
PORCENTAJE DE CRECIMIENTO	Se asigna un valor porcentual correspondiente a la relación entre el crecimiento al momento de medida y la media del crecimiento normal de los árboles en su estado de adultez, considerando para el frijol una altura de 140 cms (1,4 mts en alambre), para la swinglia 500 cms (5 mts) y para el ocobo 3000 cms (30 mts).
CONTAMINANTE	Se asigna valor a cada contaminante conforme a la expresión de contaminación observada así: sin contaminar valor cero (0), con lodo base aceite de higuera valor uno (1), con lodo base aceite de palma valor dos (2) y con lodo base aceite diesel valor cuatro (4).
TIEMPO DE EXPOSICION	Se asigna el valor directo del día de medición, que va entre 1 y 120 días, considerando la rápida afectación del <i>phaseolus vulgaris</i> frijol (3 días), los valores medios del <i>swinglea glutinosa</i> - limoncillo (15 a 40 días) y los máximos valores del <i>tabebuia rosea</i> - ocobo.

Los Indicadores de Especie Acuática, se tiene de referencia la concentración a la cual pierden la vida el 50% de los individuos a las 96 horas de exposición, estableciendo simplemente el valor como índice y clasificación de toxicidad.

Para los suelos el indicador es el porcentaje total de hidrocarburos (TPH). La valoración del indicador es la presentada en la tabla 53, correspondiente a la limpieza de los hidrocarburos del suelo.

Tabla 53. Valoración indicadores del suelo

INDICADOR	VALOR	CARACTERISTICAS
100%	ND	TPH no detectable
99%	1	TPH aceptado por API
91%	3	TPH aceptado en normatividad Louissiana

### 6.2.2 Establecimiento de la base de datos de costos ambientales

Se construye la base de datos con la valoración dada a los indicadores, como se puede ver en el Anexo A. Base de Datos de Costos Ambientales.

### 6.2.3 Aplicación del método de mínimos cuadrados ordinales

Se aplica el método de mínimos cuadrados, cuya conceptualización teórica se planteó en el numeral 3.6.3, según Guajarati, 2003, realizando los siguientes pasos.

Paso 1. Se asigna a la base de datos, los valores de Y, X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub> y X<sub>5</sub>, así:

- Y: Crecimiento de las plantas (altura en cms)
- X<sub>0</sub>: Valor de programación, por defecto (1)
- X<sub>1</sub>: Tiempo de exposición (días)
- X<sub>2</sub>: Follaje (número de hojas)
- X<sub>3</sub>: Coloración (código de colores)
- X<sub>4</sub>: Porcentaje de crecimiento
- X<sub>5</sub>: Contaminante

Paso 2. Se saca la transpuesta de la matriz de datos

Paso 3. Se multiplica la matriz de datos con su transpuesta

Paso 4. Se calcula la inversa de la matriz resultante del paso anterior

Paso 5. Se multiplica la matriz transpuesta por la columna Y



Paso 6. Se multiplica la matriz obtenida en el paso 4 con la del paso 5 y se obtienen ahí los valores de los coeficientes de la ecuación cuadrática. Ver anexo B. Cálculo de coeficientes por método de mínimos cuadrados ordinales.

### 6.3 RESULTADOS Y ANALISIS DEL COSTO AMBIENTAL

Los coeficientes obtenidos en el modelo matemático, según cálculos presentados en el anexo B, se presentan en la tabla 54.

Tabla 54. Coeficientes calculados

COEFICIENTE	VALOR
B <sub>0</sub>	22,5452029
B <sub>1</sub>	0,134543951
B <sub>2</sub>	0,463230376
B <sub>3</sub>	-1,698977444
B <sub>4</sub>	48,26189517
B <sub>5</sub>	-0,344468603

B<sub>1</sub> corresponde a la fluctuación de la variable X<sub>1</sub>, es decir al tiempo de exposición (días), como el valor es de 0,134543951, con signo positivo, permite relacionar el cambio de Y (altura o crecimiento expresado en cms) con la variabilidad del tiempo, esta relación es directa y positiva, es decir que por cada cm que crece la planta han transcurrido 0,13 de día (3,12 horas aproximadamente).

B<sub>2</sub> corresponde a la fluctuación de la variable X<sub>2</sub>, es decir al follaje o número de hojas, como es positivo, son las hojas que crecen mientras la planta va ganando altura, es decir que por cada centímetro que la planta crece, crece 0,46 de hoja (2una hoja por cada cm de crecimiento de la plata).

B<sub>3</sub> corresponde a la fluctuación de la variable X<sub>3</sub>, es decir a la coloración donde 1 corresponde a la hoja marchita y 5 a la hoja verde, el signo negativo indica deterioro de la coloración y el valor cercano a 1 indica que una vez expuesta la planta al derrame de lodo base aceite, la tendencia es a que pierda vitalidad y sus hojas se marchiten (cerca a 1).

B<sub>4</sub> corresponde a la fluctuación de la variable X<sub>4</sub>, es decir a porcentaje de crecimiento, comparado con el porte de la planta adulta en condiciones normales, el signo positivo indica crecimiento y el valor de 48,26 representa el porcentaje de crecimiento en relación al regular de las plantas.

B<sub>5</sub> corresponde a la fluctuación de la variable X<sub>5</sub>, es decir en función del contaminante, donde 4 corresponde a diesel, 3 lodo base aceite de palma, 2 a

lodo base aceite de higuera y 1 a ningún contaminante, por lo que un valor de -0,34, puede interpretarse primero por el signo negativo la tendencia es al deterioro y la cuantía que esta más cerca de los valores de no contaminación, ubica a que indistintamente sea cual sea el contaminante, se observa afectación en el crecimiento de las plantas.

Reemplazando en la ecuación del modelo matemático.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + U$$

$$Y = 22,5452029 + 0,134543951 X_1 + 0,463230376 X_2 - 1,698977444 X_3 + 48,26189517 X_4 - 0,344468603 X_5$$

De lo que se puede concluir que, una vez ocurrida la contaminación, por cada centímetro que la planta crece, se tarda 3,12 horas (0,134543951 de día), por cada dos cms de altura de la planta crece una nueva hoja (0,46320376 de número de hojas), pierde su coloración con tendencia principal al amarillamiento y marchitez (valor más cercano a 1 que a 4, 1,698977444), lo que equivale a un crecimiento limitado en un 48% (48,26189517) con indistinta afectación del contaminante que se le aplique.

## 7. CONCLUSIONES

Se presenta las conclusiones generales de la investigación y posteriormente se presentan las conclusiones técnicas particulares por área o temática investigativa.

El proyecto representa un aporte original y significativo al conocimiento frente a la solución del problema asociado a la amigabilidad ambiental de los fluidos de perforación base aceite, corroborando, a las condiciones de estudio, que el aceite de higuera puede ser un sustituto del aceite diesel usado convencionalmente. Genera menor afectabilidad ambiental en las especies vegetales *Phaseolus vulgaris* (frijol), *Swinglea glutinosa* (limoncillo), *Tabebuia rosea* (ocobo) y en la especie acuática *Oreochromis niloticus* (mojarra roja), comparado con la afectación de los lodos de perforación base aceite diesel y aceite de palma; además de la degradabilidad de dicho fluido en suelos expuestos, expresada en la disminución del porcentaje total de hidrocarburos TPH.

Durante el desarrollo investigativo, se pudo adaptar técnicas de experimentación para la evaluación de la concentración total de hidrocarburos totales en suelos, realizada convencionalmente por espectrofotometría y que se desarrolló para el proyecto por gravimetría con barrido del hidrocarburo del suelo contaminado con la ayuda de un solvente orgánico; resultados que se corroboraron con un laboratorio certificado (Chemilab). Además se realiza el ajuste del ensayo 96LC50 que originalmente se hace para juveniles de camarón en aguas saladas, adaptándose al uso de alevines de *Oreochromis niloticus* (mojarra roja) para agua dulce.

Como resultado de la investigación, se presentaron documentos parciales a diferentes eventos de orden científico nacional, obteniendo el reconocimiento regional en el premio Ecopetrol a la Innovación 2016, por su aporte en el área del conocimiento ambiental. Reconocimiento en el premio nacional ACIPET a la innovación 2016, en desarrollo del conocimiento ambiental (tercer lugar). Se presentó la ponencia "Development of an environmentally friendly oil based drilling fluid using castor oil with polar activator and in presence of strong bases (lime)" en el SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference (LACPEC), en mayo de 2017 en Buenos Aires (Argentina) y finalmente la ponencia "Evaluación técnica ambiental de la utilización del aceite de higuera en la formulación de fluidos de perforación base aceite", fue seleccionada para el XII Congreso Colombiano del Petróleo y Gas – International petroleum conference & exhibition, a llevarse a cabo en octubre de 2017 en la ciudad de Bogotá.

Este tipo de proyecto de investigación rompe paradigmas acerca de la gestión ambiental de las operaciones petroleras, fortaleciendo el conocimiento científico, abordando los contenidos técnicos propios de la ingeniería de petróleos desde la perspectiva ambiental, generando la sensibilidad ambiental en el estudiantado de dicho programa y proyectando la Universidad Surcolombiana como formadores integrales. Abre una nueva línea de investigación en lineamientos ambientales de operaciones, en primera instancia petroleras pero no excluyentes con otras ingenierías. Lo cual permitiría implantar un sello ambiental a la integralidad de la educación de la Universidad Surcolombiana.

### 7.1 FORMULACION DEL LODO

El aceite de higuera presenta un comportamiento de fluido newtoniano, densidad relativamente alta (0,958 gr/cc), bajo contenido de aromáticos, altos flash point y fire point

que lo hacen operativamente seguro. Su densidad minimiza el uso de material densificante y su alta viscosidad provee buenas condiciones de acarreo de materiales. El fluido base aceite de higuierilla debe contener como viscosificante la arcilla organofílica y su activador polar del mismo fabricante, requiere adicionalmente incluir en su formulación un humectante, emulsificante, gilsonita y carbonato de calcio como material de control de pérdida de filtrado en relación de malla 150/400, para alcanzar una viscosidad cercana a los 100 cp, geles planos moderados (12 lb/100ft<sup>2</sup>) y filtrado HP-HT de 2 ml/30 min.

El fluido formulado, se comporta como no newtoniano modelo Ley de Potencia, con viscosidad cercana a 100 cp, la que disminuye al incrementar la temperatura, excepto a los 150°C en donde la viscosidad disminuye y el comportamiento general se acerca al presentado a 65°C, evidenciando la degradación del aceite base, lo que se pudo apreciar además en la coloración de la muestra de lodo analizada. El comportamiento de los lodos de 9 y 10 ppg es muy similar, en cuanto a reología, estabilidad eléctrica, pérdida de filtrado, contenido de líquidos y sólidos. El ICC (índice de capacidad de acarreo) con bombeo de 900 gal/min en sección de 12 ¼", para los lodos de 9 y 10 ppg calculado bajo temperaturas de 65, 80, 120 y 150°C, indica muy buen nivel de limpieza de cortes, por encima de 1. Bajo las características de la formulación 9, el lodo base aceite de higuierilla presentó el mejor comportamiento como fluido a base aceite; debido a que el fluido base diesel no pudo ser probado con las concentraciones de aditivos, pues se formó una masa imposible de manipular. En tanto que el lodo base aceite de palma, a medida que se aumentó la temperatura se degradó, hasta que a los 150°C perdió por completo su fluidez. Por último el lodo base aceite de higuierilla se pudo probar obteniendo resultados de operabilidad hasta los 120°C, la reología se vió alterada a los 150°C al parecer por degradación del aceite por la temperatura.

En Colombia el aceite de higuierilla tiene 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.

## 7.2 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO AMBIENTAL

Con los lodos base aceite de palma y diesel, las plantas de *phaseolus vulgaris* (frijol) detuvieron su crecimiento y formación de hojas, tan solo 6 horas después las hojas se marchitaron y al tercer día se presenta la marchitez total de las plantas. Al remover las plantas ya deterioradas se observa que el suelo se encuentra impregnado del lodo base aceite prácticamente hasta el fondo de las macetas que es de aproximadamente de 30 cms. En tanto que con el lodo base aceite de higuierilla y al mantener las plantas sin contaminar, no se observa variaciones y el crecimiento se hace bajo los estándares normales de las plantas de frijol, es decir crecimiento por 35 a 40 días de alturas de más de 50 cms, con abundantes hojas y conservaron su coloración verde de tallo y hojas. El crecimiento de las plantas de *swinglea glutinosa* (limoncillo), se ve afectado al aplicar los OBM de diesel y palma, viéndose una menor tasa de crecimiento para el limoncillo expuesto al aceite de palma. En tanto que la tasa de crecimiento de las plantas de limoncillo expuestas al OBM de aceite de higuierilla se ve afectada respecto a las plantas sin contaminar, pero es mucho menor la afectación si se compara con el crecimiento de

las plantas expuestas a los otros OBM. Se aprecia una gran influencia en el número de hojas, siendo marcadamente negativa para las expuestas a los lodos base aceite de palma y diesel y en mucha menor cuantía para las plantas afectadas con lodo base aceite de higuierilla. De igual forma que lo observado con la afectación en crecimiento y en follaje, la coloración de las hojas evidencia el deterioro de las plantas al ser expuestas principalmente al OBM base diesel y aceite de palma, en menor grado a las expuestas a OBM base aceite de higuierilla. Se observa claramente que en todos los casos las plantas de *tabebuia rosea* (ocobo), presentan afectación debida al derrame del lodo base aceite, siendo más fuerte con los base diesel y palma y en menor cuantía con el base higuierilla. Existe una hipótesis de que el aceite recubre las raíces aislándolas de su entorno e impidiendo que pueda absorber nutrientes y agua, minimizando el crecimiento en altura como en follaje y provocando el amarillamiento de las hojas debido al deterioro del proceso de fotosíntesis. Es conveniente ampliar los estudios para determinar si esta hipótesis es válida.

Los peces *Oreochromis niloticus* (mojarra roja), expuestos, permitieron determinar que el lodo base aceite diesel se tiene 72LC50 a 5000 ppm, para los lodos base aceite de palma e higuierilla se obtiene 96LC50 a 5000 ppm, según la escala Hodge y Sterner, su toxicidad es 4, es decir ligeramente tóxico. En todos los acuarios contaminados los peces presentan pérdida de colores y los peces expuestos a higuierilla presentaron diarrea. Los lodos base aceite diesel y aceite de palma, se mantienen en la superficie del agua, los lodos base aceite de higuierilla forman aglomeraciones esféricas cuya densidad hace que vayan al fondo del acuario, los peces sienten interés y permanecen cerca y buscan comerlos.

El porcentaje de disminución de TPH para el suelo contaminado con lodo base diesel es del 12,65%, bajando los TPH desde 8,4% a 1% en 180 días, en tanto que para el suelo contaminado con lodo base higuierilla es del 32,10%, bajando los TPH desde 8,1% a no detectable en 180 días, y finalmente, para el suelo contaminado con lodo base diesel es del 38,96%, bajando los TPH desde 8,7% a no detectable en 180 días. No hay una gran desviación entre los valores de reducción de TPH para ninguno de los contaminantes empleados. Sin embargo, el proceso se hace más rápido para el suelo contaminado con aceite de higuierilla. La remoción de hidrocarburos cumple los estándares internacionales establecidos en todos los casos. A los 6 meses de contaminación de los suelos, se observa remediación por hidrocarburos, independiente del tipo de lodo usado y de si se usa o no el tratamiento con humus. Se estima que después de los 5 meses se da cumplimiento a los requerimientos de Louisiana (3%) y cerca a los 6 meses a los requerimientos de API (1%).

### 7.3 EVALUACION DEL COSTO AMBIENTAL

De lo que se puede concluir que, una vez ocurrida la contaminación, por cada centímetro que la planta crece, se tarda 3,12 horas (0,134543951 de día), por cada dos cms de altura de la planta crece una nueva hoja (0,46320376 de número de hojas), pierde su coloración con tendencia principal al amarillamiento y marchitez (valor más cercano a 1 que a 4, 1,698977444), lo que equivale a un crecimiento limitado en un 48% (48,26189517) con indistinta afectación del contaminante que se le aplique.

## 8. RECOMENDACIONES

En vista de los resultados técnicos presentados en esta investigación, se recomienda realizar formulaciones diferentes, a 100% base aceite y probar diferentes relaciones agua – aceite, ante presencia de diversos contaminantes, para determinar la estabilidad del aceite de higuera como base en fluidos base aceite. Sin perder de vista la reducción de la viscosidad requerida para mejorar la bombeabilidad, ya sea con el uso de etanol o algún agente reductor de viscosidad preferiblemente amigable con el medio ambiente.

Por otra parte, se recomienda realizar investigación referente al comportamiento del fluido de perforación base aceite de higuera con la formación, la compatibilidad con los fluidos tanto de yacimiento, como los demás fluidos de perforación y completamiento empleados tradicionalmente.

Considerando los resultados ambientales obtenidos, es recomendable continuar con este tipo de ensayos, para corroborar la condición de amigabilidad ambiental del aceite de higuera y de los lodos de perforación, fabricados a partir de dicho aceite. Entre otros, es importante evaluar el costo ambiental para el landfarming del aceite de higuera.

Hubo situaciones durante la medición de la reología, que llevan a pensar en el uso del aceite de higuera como lubricante, debido a que el mango rotador del viscosímetro se caía fácilmente durante los ensayos al quedar muy lubricado, por lo que se recomienda hacer estudios de lubricidad al aceite de higuera (“Lubricity tester”) y probarlo como lubricante en lodos base agua

Por otro lado, considerando los costos de fabricación del lodo base aceite de higuera, el alto costo del aceite puede ser modificado mediante la tecnificación e industrialización de la producción de aceite de higuera, aprovechando la variedad climatológica en Colombia puede llegar a hacer un producto competitivo en el mercado nacional e internacional.

Es prioritario buscar alianza con una empresa que facilite los insumos para la experimentación, debido a la gran dificultad para conseguir los aditivos de fluidos base aceite en Colombia, además con esto se podría subsanar la falta de equipos de laboratorio para correr ensayos conforme a la norma API RP 13 B-2.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- ACEVEDO. F., 2011. Obtención de abono (humus) líquido a base de lombriz californiana. Venezuela.
- ALEXANDER, M. (1991). Introduction to Soil Microbiology (Second ed.). Coronell University, USA: Krieger Publishing Company.
- ALEXANDER, M (1999). Biodegradation and bioremediation. Academic Press, San Diego.
- ADELEYE, S., ABDULAZIZ, AM., ENAMUL, H., y KING, F., 2012. Drilling Fluid: State of Art and Future Trend. Paper SPE 149555 PRESENTED AT THE 2012 AT THE North Africa Technical Conference and Exhibition held in Cairo, Egypt, 20-22 February 2012
- ADESINA FADAIRO, O. F. (2012). Novel formulation of environmentally friendly oil based drilling mud. Nigeria: Department of Petroleum Engineering, University of Ibadan, Nigeria
- ADEWALE DOSUNMU, S. a., & Nigeria, U. o. (2010). Development of environmentally friendly oil based mud using palm- oil and groundnut-oil . Paper SPE 140720 presented at the 2010 at the 34<sup>th</sup> Annual SPE International Conference and Exhibition held in Tinapa – Calabar, Nigeria, 31 July – 7 August 2010.
- Adaptación, uso, madera, vivero, rendimientos y silvicultura de 95 especies, en [http://elsemillero.net/nuevo/semillas/listado\\_especies](http://elsemillero.net/nuevo/semillas/listado_especies)
- AJAYEBI, A., GNANSOUNOU, E., KENTHORAI, J. 2013. Comparative life cycle assessment of biodiesel from algae and Jatropha: A case study of India. Biosource Technology 150 (2013) 429-437 pp.
- 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>
- ANAWE PAUL A., E. V. (2014). Investigating alternatives to diesel in oil based drilling mud. canaan land, Ota: Journal of Environment and Earth Science.
- ARROYO CARRETERO, M. (2009). Degradación térmica de aceites vegetales . Madrid: Universidad Rey Juan Carlos .

- ASTDR, (1998). "Reseña Toxicológica de los Hidrocarburos Totales de Petróleo"
- ASTRE. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. (TPH)". Atlanta, EE.UU.
- ASTDR, (1999). "Resumen de Salud Publica Hidrocarburos Totales de Petróleo". EEUU. Septiembre.
- AUTA, M. 2013. Extraction and Characterization of Drilling Fluid from Castor Oil. International Journal of Innovation and Applied Studies. ISSN 2028-9324 Vol 3 N° 2, 282-287 pp.
- AYALA, V., 2004. Síntesis y Evaluación de Aditivos a partir de Aceite Vegetal Nacional para Lodos de Perforación. Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico, Universidad Metropolitana, Facultad de Ingeniería – Escuela de Ingeniería Química. Caracas – Venezuela, 2004. 64-91 pp
- AZQUETA (2002). "Introducción a la economía ambiental." Ed. Mc Graw Hill.
- 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.
- BENAVIDEZ L. J, QUINTERO G., GUEVARA A., CÁCERES D., GUTIÉRREZ S., MIRANDA J. (2006). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo. NOVA publicación científica. Colombia.
- BENTA A. T., I. I. (2008). Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa. Bucaramanga: UIS
- BLUMER, M. (1976). "Polycyclic aromatic compounds in Nature". Scientific American. 234:35-45.
- BOYLE, KEVIN j. 1985. Essays on the valuation of nonmarket resources: conceptual signs and empirical case studies. Department of Agricultural Economics, University of Wisconsin-Madison.
- CASTIBLANCO, C., ETTER, A., y MITCHELL, A. 2013. Oil palm plantations in Colombia: a model of future expansión. Environmental Science y Policy 27 (2013) 172-183 pp.



- 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 .
- CAPÓ, M. (2007). Principios de Ecotoxicología: Diagnóstico, Tratamiento y Gestión del Medio Ambiente. España. Editorial Tébar.
- CHEVRON, T. Y. (2000). Drilling fluids manual. En Drilling fluids manual (págs. 387 – 411). USA
- CHEVRON, TEXACO,BP. (2000). Drilling fluids manual. In Drilling fluids manual (pp. 387 – 411). USA
- COLMERK S.A. 2014. Ficha Técnica de Aceite de Ricino USP. [comerciolmerk@hotmail.com](mailto:comerciolmerk@hotmail.com)
- COLOMBIANA DE COMBUSTIBLES S.A. 2014. Características y Generalidades de la extracción de Aceite de Higuierilla. [www.colbio.com](http://www.colbio.com)
- EKWENYE, U. 2006. Chemical Characteristics of Palm Oil Biodegradation. Biokemistri 18 (2):141-149pp. <http://www.bioline.org.br/bk> and <http://www.ajol.info/journals/biokem>. Nigeria Society for Experimental Biology
- 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>
- CORPOICA. (23 de 03 de 2011). CORPOICA lanzó primera variedad colombiana de higuierilla para clima frío moderado . Obtenido de [http://www.corpoica.org.co/sitioWeb/Noticias/vernoticia.asp?id\\_noticia=1082](http://www.corpoica.org.co/sitioWeb/Noticias/vernoticia.asp?id_noticia=1082)
- DAS, N., Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. Biotechnol. Res. Int., 2011, 941810.
- D. GUJARATI : "Basic Econometrics", Ed. McGrawHill - 4ª edition, páginas 335-560. D. Peña: "Estadística: Modelos y Métodos. (Vol.2) Modelos lineales y Series temporales", Ed. Alianza Universidad-Textos, páginas 307-548.
- 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](http://actividades/procesamiento-aceites-vegetales/extraccion-de-aceite-vegetal.html)

- 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
- DÍAZ, 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.
- DOW JONES & COMPANY, I. (25 de Noviembre de 2015). Wall street Journal. Obtenido de <http://www.wsj.com/>
- DR. QBU, Q. M. (1991). Formulation of an environmentally safe. Malaysia: Petroleum Department, University Technology of Malaysia.
- ENVITECH, C. (2015). Aplicaciones industriales del aceite de ricino. Obtenido de <http://blog.condorchem.com/tag/aceite-de-ricino/>
- ESCUELA PREPARATORIA No. 14 Tezoyuca, Mexico. (2009). Biocombustible a través de Ricinus Communis . Mexico: XVII concurso universitario, "feria de las ciencias".
- ESVENCA. (2011). Manual control de solidos. Venezuela
- Extraction and Characterization of Drilling Fluid from Castor Oil/ School of Chemical Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia. paper.
- FADAIRO ADESINA, O. D. (2013). Investigating the carrying capacity and the effect of drilling cutting on rheological properties of jatropha oil based mud. Ota, Nigeria: University of Ibadan, Covenant University Ota
- FADAIRO, A., AMELOKO, A., ADEYEMI, G., OGIDIGBO, E., AIRENDE, O. 2012. Enviromental Impact Evaluation of a Safe Drilling Mud. Paper SPE 152865 presented at the 2012 at the SPE Middle East Health, Safety Security, and Enviromental Conference and Exhibition Held in Abu Dhabi, UAE, 2-4 April 2012
- FADAIRO, A., ORODU, D., y FALONE, O. 2013. Investigating on Rheological Properties of Jatropha Oil Based Mud. Paper SPE 167551 presented at the 2013 at the Nigeria Annual International Conference Exhibition Held in Lagos, Nigeria, 30 July – 1 August 2013

- FERNANDEZ. F., GEPTS. P., LOPEZ. M., (1986). Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). Cali, Colombia.
- FREEMAN, A. M. (1992): "Panorámica de las metodologías de valoración", en Ferreiro et al. Evaluación económica de los costes y beneficios de la mejora ambiental, Monografías de la economía y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- GALLEGO, P., R. CUÉLLAR y J. DUSSÁN, (2004); "Biorremediación de residuos de petróleo". España.
- GARCIA JARAMILLO, L., & ALVAREZ 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.
- GLOBALPETROPRICES.com. (15 de 02 de 2016). Obtenido de [http://es.globalpetrolprices.com/diesel\\_prices/](http://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/)
- GOERING, C. E. et al. (1982). Fuel properties of eleven vegetable oils. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Vol. 25. Pág.1472 – 1483.
- GÓMEZ S.E., GUTIÉRREZ D.C., HERNÁNDEZ A.M., HERNÁNDEZ C.Z., LOSADA M., MANTILLA P.C., (2008). Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Colombia
- GUO, L. D. (2013). Study of the rheological properties of various oil based drilling fluids. Kuala Lumpur: University Teknologi PETRONAS.
- GUSTAV HEESS, S.L.2013. Hojas de Seguridad según reglamento N° 1907/2006 y UE N° 453/2010.
- HAMEL, J. F. (2009). "Determinación Cromatográfica De Hidrocarburos Totales En Aguas Por Microextracción En Fase Sólida". ISSN 2075-8944 Jurnal Boliviano de Ciencias, volumen 6 numero.
- H.C.H. Darley and GEORGE R. Gray Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Fifth Edition).
- HOFFMAN, David J, et al. (2003). Handbook of ecotoxicology. 2<sup>nd</sup> edition. United States of America. Lewis Publishers.

- HGASSAPA, F.N., NIANDORO, S.S., MWAISAKA, TR. 2012. Effects of Temperature on the Physicochemical Properties of Traditionalle Processed Vegetable Oils and Ther Blends. Tanzania Journal Science 38 (3) – 2012 -. 166-176 pp.
- HAWKER D., VOGT K., ROBINSON A.,(2001). Manual de perforación, procedimientos y operaciones. Datalog. Canadá.
- ICONTEC. (2001). Gestión ambiental. Guia para tratamientos de residuos de fluidos base aceite empleados en la perforación de pozos de petroleo. Bogotá, Colombia: Instituto colombiano de certificación y normas técnicas.
- IICA (2009). Guía técnica para el cultivo del frijol. Nicaragua
- INDUPALMA. (16 de 02 de 2016). indicadores aceite de palma . Obtenido de <http://www.indupalma.com/>
- INSTITUTE, A. P. I. (2000). API RP-13B, Standard Procedure for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids.
- INTEQ, B. H. (1998). Manual de Ingeniería, Fluidos. Houston, USA: Technical Communications Group.
- J. BLANCO, D. O. (2007). Society of Petroleum Engineers, “Viscoelastic System as an Alternative to UBD for Drilling a Severely Fractured Limestone Reservoir. SPE.
- KOSTAS, J. L. (1996). “Course Practical Asphaltenes Solutions & Management”. Universidad Surcolombiana. p. 1-13.
- LINNAEUS, (1758). *Oreochromis niloticus*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en [http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis\\_niloticus/es](http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/es)
- LITVINE, D., GAZUL, L., Y DABAT, M., 2014. Methodo logical and ideological options. Assesing by combining economics and psychology: fows on proximity applied to Jatropha oil in Africa. Ecological Economics 100 (2014) 85-96 pp.
- M. FEFER, P.-C. L. (2001). Environmentally Friendlier Drilling Mud Base Fluids. Calgary.

- MARTINEZ, M. A. (2009). Tecnicas desarrolladas de los sistemas de control de sólidos de los fluidos de Perforación. Lima,Peru
- MAXIM KABANOV, E. T. (2014). Designing and Running a Special Oil-Based Mud for a North Sea HPHT. Bangkok, Thailand: IADC/SPE-170528-MS.
- MI.SWACO. (2005). DRILLING FLUIDS MANUAL. OXFORD: SLB
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA . (2015). Normatividad ambiental, fluidos de perforación . Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/guias/GUIA%20X.pdf>
- MROZIK, Z. PIOTROWSKA-SEGET, S. ŁABUZEK A. (2002). Bacterial Degradation and Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon. University of Silesia, Polonia
- 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](http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/4487/1/622.3381_R924a_01.pdf)
- MUNDI, I. (08 de 02 de 2016). Diesel precio diario . Obtenido de <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=diesel>
- MUNEVAR, F. (1998). Problema de los suelos cultivados con palma de aceite en colombia . Bogotá, Colombia.
- NAVAS, D. A., & Andrea, R. P. (2010). Procesos para la obtención de petroleo y los impactos ambientales generados por actividades petroleras. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- NICOVITA. Manual de crianza de la tilapia. Perú
- (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](http://www.botanical-online.com/aceite_de_ricino.htm)
- Propiedades de los aceites vegetales . Obtenido de [http://www.botanical-online.com/aceites\\_vegetales\\_propiedades.htm](http://www.botanical-online.com/aceites_vegetales_propiedades.htm)
- PALITTAPONGARNPIM, M., P. POKETHITIYOOK, E. S. UPATHAN y L. TANGBANLUEKAL. (1998). Biodegradation of crude oil by soil microorganisms in the tropic. Biodegradation 9:83-90.

- PATEL, A., HUIZHANG, J., KE, M. y PANAMARAYHUPALAYAM, B., 2013. Lubricants and drag Reducers for Oilfield Applications – Chemistry, Performance and enviromental Impact. Paper SPE 164049 PRESENTED AT THE International Symposium on Oilfield Chemistry held in the Woodlands, Texas, USA, 8-10 April
- PEARCE David, TURNER Kerry., 1995. Economía de los recursos ambientales. Ed. Colegio de Economistas de Madrid. Celeste Ediciones. España.
- PHISIC, S. (2016). Grasas, Aceites, Acidos grasos, Trigliceridos . Obtenido de <http://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas1.html>
- 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.
- RAMIREZ JARAMILLO, L., & Cardenas Chala, D. (2005). Evaluación del proceso de producción de la higuierilla como alternativa energetica de bajo nivel de contaminación ambiental . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander .
- RAMIREZ, L. E., & CARDENAS, D. L. (2005). Evaluación del proceso de producción de la higuierilla como alternativa energetica de bajo nivel de contaminación ambiental . Bucaramanga : Universidad Industrial De Santander
- ROBELLO, S. (2014). Drilling engineering, Solutions and applications . United State: Friesens Corporation.
- RUIZ, M., Y VELASQUEZ, JC., 2012. Evaluación de impacto ambiental en aguas generado por los fluidos de perforación base aceite de soya y palma. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero de petróleo: Universidad de Oriente, Núcleo de Monogas, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Maturín Venezuela. 10-13, 55-58 pp
- RYEN CAENN, H. D. (2008). Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Sixth Edition.
- SALGADO, R., PINEDA, G., MESTA, A. M., DÍAZ, F., WANG, T. (2008). Degradación de n-alcanos por Pseudomonas aeruginosa MGP-1. Universidad Simón Bolívar. Investigación Universitaria Multidisciplinaria Año 7, N°7: 123-132.
- SAVAL, S. (2013).Bases Bioquímicas de la Bioremediación. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

- SCHAEFER, M. & FILSER, J. (2007). Efectos de la *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora chlorotica* y *Eisenia foétida* sobre las comunidades dinámicas microbianas en los suelos contaminados por petróleo. *Applied Soil Ecology*. 36, 53-62.
- SCHLUMBERGER OILFIELD REVIEW: Fundamentos de los fluidos de perforación. Houston. Julio, (2013), vol. 25, no. 1.
- SCOTT, D. T., MCKNIGHT, D. M., BLUNT-HARRIS, E. L., KOLESAR, S. E. Y LOVLEY, D. R., (1998). "Quinone moieties act as electron acceptors in the reduction of humic substances by humics-reducing microorganisms". *Environmental Science and Technology*, 32: 2984-2989.
- SERMANAT, (2003). NOM-138-SERMANAT/SS-2003. Límites Permisibles de Hidrocarburos en Suelos las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 4-5P.
- TORRES, D. K. ZULUAGA T. (2009). Tesis: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, UNAL. Colombia.
- 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.
- TERRY HEMPHILL, S. B. (1996). Hole Cleaning Capabilities of Water- and Oil-Base Drilling Fluids: A Comparative Experimental Study. Houston.
- TOLEDO. S.J., GARCIA. M.C., (2000). Nutrición y Alimentación de Tilapia Cultivada en América Latina y el Caribe. México.
- US-EPA. (1998). Seminar Series on Monitored Natural Attenuation for Ground Water, Vol. EPA/625/K-98/001.
- 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\\_revistas\\_basica/2006/12082010/rev\\_bistua\\_vol4\\_num1\\_art3.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revistas_basica/2006/12082010/rev_bistua_vol4_num1_art3.pdf)
- VAN STRAALLEN, N. M. (2002). Assessment of soil contamination-a functional perspective. *Biodegradation*, 13(1), 41-52.

- VALENCIA, M., CARDONA, C., 2014. The Columbian Biofuel Supply Chains: The assesment of current and promising scenarios base don enviromental goals. Energy Policy 67 (2014) 232-242 pp.
- VARGAS, JP., POLANIA, LE., 1992. Uso de la Sábila (Aloe Vera) como controlador de pérdida de filtrado en lodos de perforación base agua. Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos: Universidad Surcolombiana, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Petróleos, Neiva – Huila – Colombia.
- VERA G., A. R. (2011). Nueva Tecnología Aplicada A Zonas De Pérdida De Circulación En El Campo Borburata-Barinas. Caracas, Venezuela.
- WHISE, D. L. 2000. Bioremediation of contaminated soils. Marcel Decker. New York.
- XIAOQING He, a. L. (2009). Research on The Application of Environment Acceptable Modified Natural Macromolecule Based Drilling Fluid . China University of Petroleum (Beijing)
- ZAPATA, N., VARGAS, M., REYES, J., y BELMAR, G. 2012. Quality of Biodiesel and Press Cake obtained from Euphorbia lathyris, Brassica napus and Ricinus communis. Industrial Crops an Products 38 (2912) 1-5 pp.



## 10. ANEXOS

### 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 establezca 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  $26 \pm 0.5$  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  $50^{\circ}\text{C}$  ( $125^{\circ}\text{F}$ ). Mantener la celda hacia arriba durante el enfriamiento, la despresurización y desmontaje.

Se debe tener mucho cuidado en le 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 solidos 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  $4560\text{ mm}^2$  ( $7,1\text{ in}^2$ ) y las celdas HT/HP suelen tener un área de filtro de  $2258\text{ mm}^2$  ( $3,5\text{ in}^2$ ), 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 solidos 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 recibidor 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, líquido 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 pérdida de circulación en fluidos de perforación base sintéticos y base agua. *Incrementa las presiones de propagación de fracturas en pruebas con

	<p>muestras expuestas a fluidos base aceite y sintéticos.</p> <p>*Exhibe una flexibilidad que le permite deformarse a medida que la fractura.</p> <p>*Agregado en concentraciones de hasta 100 lbs/bbl detiene las pérdidas sin taponar el equipo de perforación o afectar adversamente las propiedades reológicas.</p>
Propiedades características	<p>*Apariencia, material angular negro.</p> <p>*Gravedad específica, 1,75.</p> <p>*Granulometría, (%&lt;mall 40) 100</p>
	*Granulometría, (%<mall 200) 95
Tratamiento aconsejado	<p>1. Como concentración básica para perdidas por filtración y control de pérdidas de circulación 15-25 lbs/bbl.</p> <p>2. Como píldora obturante para emplazar sobre zonas de perdida ocasional en el fondo antes de hacer un viaje, 50-100 lbs/bbl.</p> <p>3. Para lubricidad de fluidos base agua, 3-10 lbs/bbl.</p>
Presentación	Está disponible en sacos de 50 lbs.

ARCILLA ORGANOFÍLICA	
Producto	Agente viscosificante
Descripción del producto	<p>Aporta viscosidad y propiedades de suspensión a los fluidos de perforación base aceite. Es una arcilla bentonítica tratada con un compuesto de aminos 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.</p>
Aplicaciones/Funciones	<p>*Viscosificar cualquier fluido de perforación base aceite.</p> <p>*Mejorar la limpieza de pozo durante las operaciones de perforación y completación.</p> <p>*Gelificar los lodos de aceite para suspensión de largo plazo.</p>

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)	900
------------------	-----

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 PDC	12.125"	2.0"	B4 1/2 IF	182,68	1,45

<sup>i</sup> La información de la sarta fue tomada de OPERACIONES PETROAMAZONAS-ACAL-13.