

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCIÓN DE LODOS DE
PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL
AVIAR TRANSESTERIFICADO COMO FASE CONTINUA**

**JOSSY EFREN RODRIGUEZ TORRES
ELVER FABIAN CAICEDO FLOREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCIÓN DE LODOS DE
PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL
AVIAR TRANSESTERIFICADO COMO FASE CONTINUA**

**JOSSY EFREN RODRIGUEZ TORRES
ELVER FABIAN CAICEDO FLOREZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

Director

FREDY AVELLANEDA VARGAS

Ph.D. en Ingeniería química ambiental y procesos

Codirector

EMILIANO ARIZA LEON

Ph.D. en ingeniería química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por regalarme la vida, por sus bendiciones y por permitirme alcanzar esta meta.

A mis padres, Sonia Florez y Javier Caicedo a quienes con mucho esfuerzo siempre me han apoyado incondicionalmente y a quienes les debo todo.

A mi hermano por su compañía y amor.

A toda mi familia en especial a mis abuelos Francisco Caicedo y Hortensia Cornejo (qepd) quienes me brindaron aliento, amor y depositaron su confianza en mí.

A mi novia Laura Herrera por estar siempre presente y alentarme para culminar esta etapa de mi vida.

A cada uno de mis compañeros de la universidad quienes son parte de este título.

Y a todos aquellos que de una u otra manera hicieron de esto una realidad.

Elver Fabian Caicedo Florez

DEDICATORIA

A Dios, por bendecirme en todo momento y darme la oportunidad de disfrutar esta etapa de mi vida, llena de alegría y éxitos.

A mis padres Carlos Rodríguez y Elvira torres, por apoyarme en todo momento y que con sus enseñanzas, consejos y sacrificios, me han ayudado a ser la persona que soy hoy en día.

A todos mis familiares quienes depositaron su confianza en mí y me brindaron siempre su apoyo incondicional.

A todos mis compañeros de clase, con los que he compartido grandes momentos y siempre estuvieron cerca para brindarme su colaboración.

A mis amigos por sus buenos deseos y siempre apoyarme para seguir adelante.

Gracias.

Jossy Efren Rodriguez Torres

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por formarnos como profesionales íntegros.

A nuestro director, el doctor Fredy Avellaneda y al codirector, el doctor Emiliano Ariza por compartirnos sus conocimientos y colaboración en la elaboración y desarrollo de este trabajo.

Al grupo de investigación INTERFASE, en especial a las ingenieras Ingrid Rojas y Tatiana Dueñas por brindarnos su apoyo y enseñanzas en momentos de adversidad.

A los profesionales de apoyo de la Escuela de Ingeniería Química, el Ingeniero Guillermo Aceros, al químico Joaquín Orozco y al técnico Eduardo Carreño.

Al Ingeniero Félix Arenas encargado del laboratorio de Fluidos y al Ingeniero Mario Torres encargado del laboratorio de Lodos y Cementos, por sus orientaciones en las pruebas realizadas.

A la empresa MAC POLLO S.A., por la donación de la materia prima.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN	20
1.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	20
1.1.1 Densidad.....	20
1.1.2 Reología.....	20
1.1.2.1 Viscosidad (μ)	21
1.1.3 Pérdida de filtrado	26
1.1.4 pH	27
1.1.5 Alcalinidad.....	28
1.1.6 Lubricidad	28
1.1.7 Estabilidad de la emulsion	28
1.2 FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	29
1.2.1 Limpiar el fondo del pozo y acarrear los recortes a la superficie	29
1.2.2 Controlar las presiones	29
1.2.3 Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación.....	30
1.2.4 Ayuda a soportar el peso de la sarta	30
1.2.5 Mantener la estabilidad del pozo	31
1.2.6 Suspender y descargar los recortes	31
1.2.7 Transmisión de energía hidráulica a las herramientas y broca	32
1.2.8 Permitir la adquisición de información de la zona perforada.....	32
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	34
1.3.1 Fluidos base agua.....	34
1.3.1.1 Fluidos no dispersos	34
1.3.1.2 Fluidos dispersos	34
1.3.1.3 Fluidos cálcicos.....	34

1.3.1.4 Fluidos poliméricos	35
1.3.1.5 Fluidos de bajo contenido de sólidos	35
1.3.1.6 Fluidos de agua salada	35
1.3.2 Fluidos de perforación aireados	36
1.3.3 Fluidos base aceite	36
1.3.3.1 Características del aceite	37
1.3.3.2 Ventajas y desventajas de fluidos base aceite	37
1.3.3.4 Fluidos 100% aceite	38
1.3.3.5 Emulsiones inversas	38
2. BODIESEL	41
2.1 OBTENCIÓN DE BODIESEL	41
2.1.1 Pretratamientos para la obtención de biodiesel	41
2.1.1.1 Esterificación	42
2.1.2 Transesterificación	42
2.1.2.1 Transesterificación ácida	43
2.1.2.2 Transesterificación alcalina	44
2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BODIESEL FRENTE AL DIÉSEL	44
2.2.1 Estabilidad oxidativa	44
2.2.2 Emisiones más bajas de biodiesel	44
2.2.3 Problemas a bajas temperaturas	45
2.2.4 Disponibilidad y renovabilidad del Biodiesel	45
2.2.5 Viscosidades más altas del Biodiesel	45
2.3 DIFERENCIAS ENTRE EL DIESEL Y BODIESEL	46
2.4 GRASA DE POLLO COMO MATERIA PRIMA POTENCIAL PARA BODIESEL	46
2.5 COSTOS DEL BODIESEL	47
2.5.1 Costos biodiesel de soya	48
3. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL BODIESEL	50
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	50
3.1.1 Propiedades físicas	51

3.1.2 Propiedades químicas	51
3.2 PRETRATAMIENTO MATERIA PRIMA.....	51
3.2.1 Esterificación ácida.....	51
3.2.2 Caracterización de aceite esterificado.....	52
3.3 OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	52
3.3.1 Reacción de transesterificación alcalina.....	53
3.3.2 Caracterización del biodiesel	53
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	54
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	54
4.1.1 Propiedades físicas y químicas del aceite aviar.....	54
4.2 PRETRATAMIENTO MATERIA PRIMA.....	55
4.2.1 Esterificación ácida	55
4.2.2 Caracterización del aceite esterificado	57
4.3 OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	57
4.3.1 Reacción de transesterificación.....	57
4.3.2 Caracterización Biodiesel.....	58
5. FORMULACIÓN DE FLUIDOS DE EMULSIÓN INVERSA UTILIZANDO BIODIESEL DE ACEITE RESIDUAL AVIAR COMO FASE CONTINUA	62
5.1 ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE SUSTITUTOS DE LA FASE CONTINUA EN LODOS DE EMULSIÓN INVERSA	62
5.1.1 Estudio de la factibilidad del uso del aceite de palma como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.....	63
5.1.2 Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa	63
5.1.3 Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa	64
5.1.4 Factibilidad técnica y económica del uso de biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa	65
5.1.5 Factibilidad del uso de aceite mineral blanco grado técnico como fase continua en lodos de perforación	66

5.1.6 Otras investigaciones.....	67
5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	68
5.2.1 Tipos de variables.....	70
5.2.1.1 Variable independiente	70
5.2.1.2 Variable dependiente	70
5.2.1.3 Variables extrañas	70
5.2.1.4 Variable de bloqueo	70
5.2.2 Variables analizadas en este estudio.....	71
5.3 PRUEBAS PRELIMINARES DEL BODIESEL OBTENIDO.....	72
5.3.1 Caracterización del diesel y biodiesel	72
5.3.2 Pruebas de compatibilidad.....	74
5.3.2.1 Procedimiento prueba de compatibilidad	76
5.4 PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS.....	78
5.4.1 Formulaciones con diesel y biodiesel	78
5.4.2 Pruebas de laboratorio.....	79
5.4.2.1 Densidad.....	79
5.4.2.2 Prueba de reología	79
5.4.2.3 Filtrado API	79
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	81
6.1 ANÁLISIS FORMULACIÓN 90/10.	82
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS FORMULACIÓN 80/20.	87
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS FORMULACIÓN 70/30.	91
6.4 ANÁLISIS FORMULACION 60/40.	95
7. CONCLUSIONES	100
8. RECOMENDACIONES.....	102
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS.....	119

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales funciones del fluido de perforación.	33
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los fluidos base aceite.	37
Tabla 3. Comparación de las características del diesel y biodiesel.	46
Tabla 4. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W. Fase continua Diesel No. 2	48
Tabla 5. Costo por barril emulsion inversa 70/30 O/W. Fase continua Biodiesel de soya.	49
Tabla 6. Comparación de las propiedades del aceite aviar con otros estudios.	54
Tabla 7. Resultados de las esterificaciones.	55
Tabla 8. Comparación de propiedades del aceite aviar y aceite esterificado.	57
Tabla 9. Resultados de las transesterificaciones.	58
Tabla 10. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del aceite aviar, aceite esterificado y biodiesel comparado con la norma EN 14214.	59
Tabla 11. Parámetros medibles.	72
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del Diesel y Biodiesel.	73
Tabla 13. Viscosidad cinemática del diésel y biodiesel a diferentes temperaturas.	74
Tabla 14. Cantidad de aditivo y tiempo de agitación.....	76
Tabla 15. Resultados prueba de compatibilidad.	78
Tabla 16. Formulación propuesta por el fabricante de los aditivos.	78
Tabla 17. Resultados de pruebas con diesel.	81
Tabla 18. Resultados de pruebas con biodiesel.	82
Tabla 19. Propiedades de la Formulación 90/10.....	82
Tabla 20. Reología de la formulación 90/10.	83

Tabla 21. Resultados de índice de la ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 90/10.....	85
Tabla 22. Propiedades de la formulación 80/20.....	87
Tabla 23. Reología de la formulación 80/20.	88
Tabla 24. Resultado de índice de ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 80/20.	89
Tabla 25. Propiedades de la formulación 70/30.....	91
Tabla 26. Reología de la formulación 70/30.	92
Tabla 27. Resultados de índice de la ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 70/30.....	93
Tabla 28. Propiedades de la formulación 60/40.....	95
Tabla 29. Reología de la formulación 60/40.	96
Tabla 30. Resultados de índice de la ley de potencias e índice de consistencia para la formulación 60/40.....	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Emulsión inversa	39
Figura 2. Reacción de esterificación.	42
Figura 3. Mecanismo de Transesterificación. [33].....	43
Figura 4. Diagrama de las etapas de investigación.	50
Figura 5. Montaje reacción de esterificación.....	52
Figura 6. Índice de acidez y rendimiento de las esterificaciones.	56
Figura 7. Comparación de los cambios físicos presentados por el aceite aviar y aceite esterificado.	57
Figura 8. Comparación de los cambios físicos presentados por el aceite aviar, esterificado y transesterificado (biodiesel).	61
Figura 9. Variación de la viscosidad del diésel y biodiesel a diferentes temperaturas.	74
Figura 10. Resultados pruebas de compatibilidad.	77
Figura 11. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte formulación 90/10.....	84
Figura 12. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 90/10.	84
Figura 13. Viscosidad Efectiva vs Velocidad de corte, formulación 80/20.	88
Figura 14. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 80/20.	89
Figura 15. Viscosidad Efectiva vs Velocidad de corte, formulación 70/30.	92
Figura 16. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 70/30.	93
Figura 17. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte, formulación 60/40.....	96
Figura 18. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 60/40.	97

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. NORMA UNE EN ISO 660: ACEITES Y GRASAS ANIMALES DE ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ Y DE LA ACIDEZ.	119
ANEXO B. CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE METANOL Y CATALIZADOR EN LA REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN.....	121
ANEXO C. REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN Y TRANSESTERIFICACIÓN.....	122
ANEXO D. CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE METANOL Y CATALIZADOR EN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN.....	123
ANEXO E. DISEÑO EXPERIMENTAL ROJAS Y DUEÑAS	124
ANEXO F. NORMA EN 14103: PRODUCTOS DERIVADOS DE ACEITES Y GRASAS. ESTERES METÁLICOS DE ÁCIDOS GRASOS (FAME). DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE ESTER Y ESTER METÁLICO DE ÁCIDO LINOLÉICO.	125
ANEXO G. CONDICIONES DE CROMATOGRAFÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL %FAME.....	127
ANEXO H. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LAS FORMULACIONES.....	128

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCION DE LODOS DE PERFORACION DE EMULSION INVERSA A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL AVIAR TRANSESTERIFICADO COMO FASE CONTINUA*

AUTORES: ELVER FABIAN CAICEDO FLOREZ
JOSSY EFREN RODRIGUEZ TORRES**

PALABRAS CLAVES: FLUIDOS DE PERFORACIÓN, EMULSIÓN INVERSA, BIODIESEL, TRANSESTERIFICACIÓN.

DESCRIPCIÓN

La necesidad de buscar fuentes de energías alternativas de origen no hidrocarburo, con alto nivel de calidad y económicamente viables, han incrementado el estudio de diferentes tipos de aceites y grasas animales, que puedan cumplir con aplicaciones similares a las energías tradicionalmente utilizadas y que además causen menor impacto ambiental. Este proyecto tiene como objetivo la producción de biodiesel a partir de aceite residual aviar para ser empleado como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa, inicialmente se realizó la caracterización de la materia prima para evaluar sus propiedades y se determinó el tratamiento a seguir hasta la obtención de biodiesel. Este aceite presentó un alto índice de acidez, el cual necesito una reacción de esterificación para lograr una reducción de este parámetro, debido a que incide directamente en la calidad del biodiesel, donde las condiciones fueron elegidas según un estudio previo realizado por el grupo de investigación INTERFASE de la universidad industrial de Santander, luego se procedió a identificar las condiciones adecuadas para llevar a cabo la obtención de biodiesel bajo una reacción de transesterificación alcalina, donde se tomaron unas condiciones de acuerdo al estudio realizado por Rojas y Dueñas, basados en la cantidad de aditivos empleados, esto pensando en los grandes volúmenes de fluidos que se utilizan en la perforación, posteriormente se caracterizó el biodiesel y se realizaron pruebas de compatibilidad con los aditivos utilizados, luego se realizaron 4 formulaciones para la fase continua diesel y biodiesel, con el fin de comparar el comportamiento de estos y verificar el desempeño del biodiesel, donde se obtuvo como resultado general un comportamiento similar, con buen desempeño en suspensión y limpieza de pozo, cuando la fase dispersa es mayor al 40%.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Doctor Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Codirector: Doctor Emiliano Ariza León.

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL STUDY OF THE PRODUCTION OF REVERSE EMULSION DRILLING MUD FROM TRANSESTERIFIED AVIAN RESIDUAL OIL AS A CONTINUOUS PHASE*

AUTHOR: ELVER FABIAN CAICEDO FLOREZ
JOSSY EFREN RODRIGUEZ TORRES**

KEYWORDS: drilling fluids, inverse emulsion, biodiesel, transesterification

DESCRIPTION:

The need to search alternative energy sources of non-hydrocarbon origin, with a high level of quality and economically viable, have increased the study of different types of oils and animal fats, that can satisfy similar applications to the traditional energies moreover to decrease environmental impact. This project aims to produce biodiesel from avian residual oil to be used as a continuous phase in reverse emulsion drilling muds, initially characterizing the raw material to evaluate its properties and determining the treatment to follow to produce biodiesel. This oil (chicken fat) present a high acid value, which requires an esterification reaction to achieve a reduction of this parameter, because it directly affects the biodiesel quality, the conditions were chosen according to a previous study carried out by the research group INTERFASE from Industrial University of Santander, then, we proceeded to identify the suitable conditions to carry out the biodiesel production under an alkaline transesterification reaction, the conditions were taken according to the previous study by Rojas and Dueñas, calculating the correct amounts of additives, due to the large volumes of fluids used in drilling, afterwards the biodiesel was characterized and compatibility tests were performed with the additives used, followed by 4 formulations for the continuous diesel and biodiesel phase, to compare the behavior and verify the biodiesel performance, the results showed a similar behavior, with useful performance in suspension and well cleaning when the dispersed phase is greater than 40%.

* Undergraduate Project

** Physical-Chemical Sciences Faculty, School of Petroleum Engineering. Director: Doctor Fredy Avellaneda Vargas. Codirector: Doctor Emiliano Ariza León

INTRODUCCIÓN

Los fluidos comúnmente utilizados como base para la preparación de lodos de perforación son agua y aceite, de los cuales los fluidos base agua tienen mayor aplicación a nivel mundial, por otro lado, los base aceite han sido creados para desempeñar el trabajo en formaciones arcillosas y a su vez cubrir las deficiencias que presentan los fluidos base agua que son, entre otras, poca lubricación, mal comportamiento en pozos profundos, no son resistentes a altas temperaturas, etc [1].

Los fluidos de perforación de emulsión inversa utilizan generalmente diesel como fase continua para la preparación de las formulaciones, el cual genera un gran impacto ambiental desfavorable, principalmente por su alto contenido de aromáticos superior al 22%; componente que afecta la fauna acuática, retarda la generación de la capa vegetal y crea efectos contaminantes al medio ambiente. [2,3].

En los últimos años se han buscado nuevas alternativas para mitigar el impacto de estos fluidos, con el fin de encontrar un aceite cuyo origen no provenga de los hidrocarburos, que brinde los mismos beneficios que los aceites utilizados comúnmente y que reemplace al diésel o a otro tipo de aceite derivado del petróleo que se utilizan en estas preparaciones. En la universidad industrial de Santander se han realizado estudios con aceites de tipo vegetal (soya, palma) y glicerina [4, 5]; pero hasta el momento no se ha probado con aceites de tipo grasa animal.

Este estudio tiene como objetivo, la producción de biodiesel a partir un residuo, como lo es el aceite aviar, que se genera en grandes cantidades, de fácil obtención, de bajo costo [6], mediante reacciones de esterificación y transesterificación, con condiciones seleccionadas según la bibliografía consultada, [7, 8, 9], para ser

utilizado como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa, estudiando su filtrado y comportamiento reológico.

1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Un fluido de perforación está compuesto por un componente base o fase continua (generalmente agua o aceite) y aditivos específicos que cumplen con características fisicoquímicas para dar propiedades especiales a fin de que cumpla funciones específicas para el control de la operación llevada a cabo, de acuerdo con las necesidades requeridas. Este fluido es bombeado desde superficie, pasando por la broca y regresando a la misma por el espacio anular en un proceso de recirculación [10].

1.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

1.1.1 Densidad Es el peso de un volumen de un fluido y se define como la relación de masa dividida por el volumen. Las unidades comunes de densidad del campo petrolífero son las libras por galón (lb/gal) o libras por barril (lb/bbl).

Esta propiedad define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existente en las formaciones perforadas.

Se determina pesando en una balanza un volumen conocido [5].

1.1.2 Reología Es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia.

Al tomar ciertas medidas de un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, la presión y la velocidad de corte.

La reología está relacionada con los esfuerzos cortantes generados por el lodo mientras este fluye y el comportamiento del mismo en la suspensión de los cortes hasta la superficie y la generación de fuerzas estáticas de gel para suspender los sólidos cuando se detiene la circulación [11].

1.1.2.1 Viscosidad (μ) Es el termino reológico más conocido. Se define como esfuerzo cortante de un fluido dividido por la correspondiente velocidad de corte:

$$\mu = \tau / \gamma \quad \text{Ecuación 1}$$

τ : Esfuerzo de corte.

γ : Velocidad de corte.

En su sentido más amplio, la viscosidad se puede describir como la resistencia interna de un fluido a circular. Define la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza del pozo, de mantener en suspensión y desalojar los cortes y de facilitar su decantación en la zaranda.

En la industria petrolera, los términos presentados a continuación se utilizan para describir la viscosidad y las propiedades reológicas del fluido de perforación [12]:

- **Viscosidad Embudo (seg/qt o seg/l).** Se determina midiendo el tiempo requerido para que una muestra de lodo fluya a través de un embudo de Marsh es una prueba rápida de la consistencia de un fluido de perforación. La prueba consiste básicamente en llenar el embudo con una muestra de lodo y entonces medir el tiempo requerido para que un cuarto de galón de la muestra fluya desde el. La viscosidad de embudo (viscosidad marsh) está dada en segundos por cuarto de galón (s/qt). El embudo se calibra con agua que tiene una viscosidad de embudo o marsh de 26 s/qt [12].

- **Viscosidad Efectiva (cP o mPa.seg).** La viscosidad efectiva (μ_e) de un fluido es la viscosidad bajo condiciones específicas. Estas condiciones incluyen la velocidad de corte, la geometría por donde fluye el fluido, la presión y la temperatura [12]. La viscosidad de un fluido no newtoniano cambia con el esfuerzo de corte.
- **Viscosidad Aparente (cP o mPa.seg).** La viscosidad aparente está dada por la indicación del viscosímetro de lodo a 300 RPM (Θ_{300}) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM (Θ_{600}) [12].

La viscosidad aparente (VA) es una medida relativa a la resistencia del fluido a circular. Por efectos de adhesión y cohesión proporcionado por la atracción entre las moléculas y el comportamiento de las partículas, suspendidas en el fluido de perforación.

$$V_a = \Theta_{600}/2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Θ_{600} : Indicación del viscosímetro a 600 RPM.

- **Viscosidad Plástica (cP o mPa.seg).** La viscosidad plástica (VP) se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica de los sólidos [12].

$$VP = \Theta_{600} - \Theta_{300} \quad \text{Ecuación 3}$$

Θ_{600} : Indicación del viscosímetro a 600 RPM.

Θ_{300} : Indicación del viscosímetro a 300 RPM.

La viscosidad plástica es afectada principalmente por:

1. La concentración de sólidos.

2. El tamaño y la forma de los sólidos.
 3. La viscosidad de la fase fluida.
 4. La presencia de algunos polímeros de cadena larga
 5. Las relaciones aceite-agua (A/A) o Sintético-Agua (S/A) en los fluidos de emulsión inversa.
- **Punto Cedente- Yield Point (YP).** Es el segundo componente de la resistencia al flujo en un fluido de perforación, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de [12]:
 1. Las propiedades de la superficie de los sólidos contenidos en el lodo,
 2. La concentración en volumen de estos sólidos,
 3. El ambiente iónico del líquido que rodea los sólidos

Yield point se mide en lb/100 ft² y se calcula con la siguiente ecuación:

$$YP = \theta 300 - VP \qquad \text{Ecuación 4}$$

$\theta 300$: Indicación del viscosímetro a 300 RPM.

VP: Viscosidad plástica.

- **Esfuerzo Cedente (YS).** Es la fuerza requerida para iniciar el flujo; el valor calculado del esfuerzo cortante cuando la velocidad de corte es cero; es independiente del tiempo, pero se considera una resistencia gel en un tiempo cero [5].

Se ha determinado que, para perforación de desviación controlada, de alcance extendido y horizontal, los valores de viscosidad a baja velocidad de corte (6 y 3

RPM) tienen un mayor impacto sobre la limpieza del pozo que el punto cedente, además de proporcionar la suspensión de barita bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas.

El esfuerzo cedente se mide en lb/100 ft² y se calcula con la siguiente ecuación:

$$YS = (2 \times \theta_3) - \theta_6 \quad \text{Ecuación 5}$$

θ_3 : Indicación del viscosímetro a 3 RPM.

θ_6 : Indicación del viscosímetro a 6 RPM.

- **Esfuerzos de Gel.** Las fuerzas gel a 10 segundos y 10 minutos se miden con el viscosímetro Fann (VG meter), esta fuerza gel indica las fuerzas de atracción (gelación) de las partículas de un fluido de perforación bajo condiciones estáticas. Una excesiva gelificación es el resultado de una alta concentración de sólidos, lo que lleva a la floculación del lodo (consecuencia indeseable pues esto causaría un aumento de viscosidad, gelificación y filtrado) [12].

Signos de problemas con las propiedades reológicas del lodo a menudo son reflejados por el excesivo desarrollo de la fuerza gel del lodo. Cuando existe un amplio rango entre el gel inicial y el de 10 minutos, estas son llamadas “geles progresivos” (esta no es una situación deseable, pues la fuerza para iniciar el movimiento será cada vez mayor). Si el gel inicial y el de 10 minutos son ambos altos, sin una diferencia apreciable entre ellos, estos se denominan “High-flat Gels” (también indeseables). No debe permitirse que la gelificación adquiera un valor más alto de lo necesario para ejecutar las funciones de suspensión de recortes y material densificante.

- **Modelos reológicos.** La medición de los fluidos de perforación y el monitoreo de sus propiedades reológicas nos permite determinar la capacidad de limpieza,

su poder para levantar los sólidos de la perforación y analizar el comportamiento de sus propiedades cuando están presentes contaminantes, sustancias químicas y los cambios de temperatura [4].

Las propiedades del lodo durante las operaciones de perforación deben ser controladas con el fin de asegurar un desempeño adecuado, sobre todo las asociadas a sus propiedades de flujo, específicamente las de reología básica, asociadas a las relaciones tensión de corte- velocidad de corte [5].

Con el fin de determinar exactamente los reogramas de los fluidos de perforación no Newtonianos, es necesario el uso de un viscosímetro FANN. No existen ecuaciones matemáticas que reproduzcan la reología de los lodos en su totalidad, pero se han propuesto ciertas ecuaciones que en cierta manera se aproximan a las complejas relaciones entre tensión de corte y la velocidad de corte. Estas ecuaciones reciben el nombre de modelos reológicos [4].

La reología permite analizar la hidráulica en la perforación rotatoria. Para ello, se utilizan normalmente los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia por lo simple de las ecuaciones de flujo y la facilidad con la que se estiman los parámetros involucrados.

Modelo plástico de bingham. Este modelo se apoya en los datos suministrados por el uso de un viscosímetro FANN, y las lecturas en su dial a 600 RPM y 300 RPM, estas lecturas se grafican en coordenadas rectangulares y se unen en una línea recta, la cual viene dada por el valor de la pendiente y su corte con la ordenada en el origen.

Ley de potencias. Describe el comportamiento de fluidos pseudoplásticos y está en función de los parámetros “n y K” [13].

- n: Índice de ley de potencias

$$n = \frac{\log\left(\frac{R1}{R2}\right)}{\log\left(\frac{V1}{V2}\right)} \quad \text{Ecuación 6}$$

n: Medida del grado de desviación con respecto al comportamiento de un fluido newtoniano.

R1: Lectura del dial a RPM 1

R2: Lectura del dial a RPM 2

V1: Velocidad a la lectura del dial RPM1

V2: Velocidad a la lectura del dial RPM2

- K: Índice de consistencia

$$k = \frac{\tau}{\gamma^{2^n}} \quad \text{Ecuación 7}$$

τ : esfuerzo de corte lb/100ft²

γ : Velocidad de corte (1/s)

na y nb representan el índice de ley de potencia a altas y bajas velocidades respectivamente y se hallan utilizando la ecuación 6.

Ka y Kb representan el índice de consistencia a altas y bajas velocidades, respectivamente y se hallan utilizando la ecuación 7.

1.1.3 Pérdida de filtrado Los fluidos de perforación se componen de una fase líquida y partículas sólidas. La filtración se refiere a la acción mediante la cual la presión diferencial generada cuando la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido en el pozo es mayor que la presión de formación hace entrar a la fase

líquida del lodo de perforación dentro de una formación permeable. Durante este proceso, las partículas sólidas son filtradas, formando una torta. Si la fase líquida también contiene un líquido inmiscible, tal como una salmuera en un lodo base aceite, entonces las gotas del líquido inmiscible también se depositarán en la torta (cake) y contribuirán al control de filtración [11].

La filtración ocurre bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas, durante las operaciones de perforación. La filtración estática ocurre cuando el lodo está en reposo (durante las conexiones, los viajes o cuando el fluido no está circulando) y el espesor de la torta aumenta con el tiempo. La filtración bajo condiciones dinámicas ocurre mientras el fluido de perforación está circulando, la torta es más delgada pero la pérdida de fluido es mayor.

Existen cinco factores que afectan principalmente la filtración: el tiempo, la diferencia de presión – compresibilidad del revoque, viscosidad, permeabilidad del revoque y composición y distribución de los sólidos.

Se tienen varios métodos para determinar el filtrado de un fluido de perforación el filtrado API a presiones moderadas, presión (100 psi) y temperatura ambiente. El filtrado de alta presión alta temperatura HPHT a condiciones de 500 psi y 250 °F o más, el filtrado a PPT (Prueba de taponamiento de permeabilidad) a condiciones de 100 psi o más y 250°F o más y el FANN 90 que es una filtración dinámica a alta presión y alta temperatura.

1.1.4 pH El valor de pH se usa para describir la acidez basicidad de las soluciones. El valor de pH se define como logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. Bajos valores de pH corresponden a una acidez creciente y altos valores de pH corresponden a una alta basicidad. Un cambio de una unidad de pH corresponde a un aumento de diez veces la concentración de iones hidrógeno.

En general los lodos de perforación deben ser alcalinos con pH que oscilen entre 8 y 13 para prevenir la corrosión en la tubería, preservar y activar los aditivos del lodo y mantener las propiedades reológicas [5].

1.1.5 Alcalinidad La alcalinidad es el poder ácido neutralizante de una sustancia. La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de los iones solubles en agua que pueden neutralizar ácido, además, de indicar la concentración de iones oxidrilos (OH^-) en exceso en una solución acuosa.

En un lodo, la prueba debe realizarse directamente en él o en el filtrado.

Los resultados obtenidos brindan una estimación de la concentración de los iones hidroxilo (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) en el lodo, que son los directos responsables de la alcalinidad del filtrado y del lodo [14].

La alcalinidad de un lodo base aceite se determina rompiendo la emulsión y analizando el volumen de la mezcla hasta su punto final. El número de cc de ácido sulfúrico utilizado en la titulación es reportado como alcalinidad del lodo [14].

1.1.6 Lubricidad Se define como la habilidad del mismo para lubricar la sarta de perforación en el pozo o la disminución de la resistencia friccional de la sarta a la rotación y al movimiento vertical de esta dentro del hoyo (torque y arrastre respectivamente), incrementando la vida útil de las brocas y sartas. Su mejoramiento e implementación en el lodo resulta de gran importancia para las operaciones de perforación [14].

1.1.7 Estabilidad de la emulsion La Estabilidad Eléctrica (ES) constituye una indicación relativa de la estabilidad de la emulsión. Se trata de una medida del voltaje requerido para romper la emulsión y permitir que las gotas de agua emulsionada se conecten, permitiendo la transmisión de la corriente eléctrica.

Las emulsiones fuertes requieren altos voltajes para fusionar las gotas de agua y romper la emulsión. La estabilidad eléctrica se registra en voltios. Varios factores principales afectan la estabilidad eléctrica: contenido de agua, sólidos humectados por agua, emulsificación, temperatura y tipo de sólidos [5].

1.2 FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones del lodo de perforación describen las tareas que el fluido es capaz de desempeñar a lo largo de su recorrido en pozo para obtener unos buenos resultados en la operación que se esté realizando y una seguridad total de las personas que la llevan a cabo [15]. Las funciones más comunes de los lodos de perforación son las siguientes:

1.2.1 Limpiar el fondo del pozo y acarrear los recortes a la superficie El eliminar del agujero los recortes es una de las más importantes funciones del fluido de perforación. El fluido cuando entra la formación ejerce una acción de chorro que mantiene la superficie del fondo del agujero y las paredes del pozo limpios de recortes. Esto permite tener una gran eficiencia en la perforación, evitar pegas de tuberías o atascamientos que pueden ser causador por acumulación de recortes de formación.

La circulación de fluidos eleva del fondo del pozo los recortes hacia la superficie. Bajo la influencia de la gravedad, los recortes tienden a sumergirse a través del fluido ascendente. Pero, circulando un volumen suficiente de fluido con la velocidad adecuada para vencer esta fuerza, los recortes son llevados a la superficie [13].

1.2.2 Controlar las presiones La presión ejercida por la columna de fluido en condiciones estáticas se llama presión hidrostática. Esta presión depende de dos parámetros: densidad- profundidad, además, es utilizada para tener controlada la

presión de formación y mantener la estabilidad de las paredes. Generalmente la presión hidrostática es igual o mayor a la de la formación, para asegurar que los fluidos de perforación no fluyan dentro del pozo. El peso de lodo usado está limitado por el peso mínimo necesario para controlar las presiones de la formación y el peso máximo del lodo que no fracturara la formación [16].

1.2.3 Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor por fricción en la broca y en las zonas donde la columna de perforación rotatoria roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la broca y el conjunto de perforación, alejando este calor de la fuente y distribuyéndolo en todo el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la columna de perforación hasta temperaturas más bajas que la temperatura de fondo. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por fricción. Las brocas, los motores de fondo y los componentes de la columna de perforación fallarían más rápidamente si no fuera por los efectos refrigerantes y lubricantes del fluido de perforación.

Los lodos base de aceite y sintético lubrican mejor que la mayoría de los lodos base agua, pero estos pueden ser mejorados mediante la adición de lubricantes. En cambio, los lodos base agua proporcionan una mayor lubricidad y capacidad refrigerante que el aire o el gas [15].

1.2.4 Ayuda a soportar el peso de la sarta A medida que el pozo se hace más profundo, la sarta de perforación se hace más pesada y este peso cada vez mayor debe ser soportado por el taladro. Debido al desplazamiento en el fluido de perforación, la sarta experimenta un efecto de boyancia o flotación, lo cual implica una reducción del peso que ha de soportar el equipo de perforación. Entonces al subir la densidad del lodo se puede reducir la carga en superficie en grandes profundidades [17].

Al aumentar las profundidades, el peso soportado por el equipo de superficie va aumentando considerablemente. Debido a que la tubería está sumergida en el fluido, esta sufre un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del fluido desplazado; un aumento en la densidad del fluido aumentará el empuje y reducirá el peso total soportado por el equipo. Esta técnica de reducción de peso debe aplicarse con un criterio muy amplio y teniendo un completo conocimiento de las estructuras geológicas que vamos a perforar, para evitar pérdidas de fluido y pegaduras de tuberías por presión diferencial [13].

1.2.5 Mantener la estabilidad del pozo A medida que se va perforando la formación, las paredes de ésta, se van volviendo inestables, a tal grado que se pueden generar derrumbes y posterior atascamiento de tubería, el fluido de perforación debe de poder sostener y estabilizar las paredes del pozo mediante la formación de una pequeña capa de lodo, lisa, delgada, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible [18].

1.2.6 Suspender y descargar los recortes Cuando se interrumpe la circulación, el fluido debe mantener en suspensión los recortes de perforación. Un buen fluido de perforación debe tener propiedades que le permitan acarrear los recortes durante la perforación y soportarlos durante el tiempo que estuvo suspendida la misma, ya que si caen causaran problemas al ingresar tuberías nuevamente. Para lograr esta suspensión son útiles el punto de gel y de cedencia; estas propiedades al igual que el resto, deben controlarse con el fin de lograr el punto óptimo de trabajo de cada una de ellas, cuando estos se encuentran en circulación son fluidos ligeros y cuando quedan en reposo tienden a formar una estructura gelatinosa debida a las cargas electroquímicas de las fases reactivas, además, el fluido debe permitir que una vez que los cortes lleguen a la superficie se puedan eliminar fácilmente, bien sea por medios mecánicos (desarenador) o por medios físicos (la precipitación) [13].

1.2.7 Transmisión de energía hidráulica a las herramientas y broca La energía hidráulica puede ser utilizada para maximizar la velocidad de penetración (ROP), mejorando la remoción de recortes en la broca. Esta energía también alimenta los motores de fondo que hacen girar la broca y las herramientas de Medición al Perforar (MWD) y Registro al Perforar (LWD). Los programas de hidráulica se basan en el dimensionamiento correcto para utilizar la potencia disponible (presión o energía) de la bomba de lodo a fin de maximizar la caída de presión en la broca u optimizar la fuerza de impacto del chorro sobre el fondo del pozo. Los programas de hidráulica están limitados por la potencia disponible de la bomba, las pérdidas de presión dentro de la columna de perforación, la presión superficial máxima permisible y el caudal óptimo [15].

1.2.8 Permitir la adquisición de información de la zona perforada Los fluidos de perforación se modifican con el propósito de mejorar el aspecto de evaluación de la formación. Con mayores viscosidades se tienen mejores recortes; con menor filtración, se minimiza la invasión del fluido a la formación y con fluidos especiales para mejorar las características de los registros y las pruebas de formación. Los fluidos base aceite dificultan la evaluación de los horizontes potencialmente productores y los fluidos base agua salada limitan el uso del registro de potencial espontáneo para reconocer zonas permeables. La formación del enjarre limita la obtención de la información del lado de la pared de los núcleos obtenidos, mientras que la invasión de agua o aceite afectan la resistividad, no indican las condiciones del agujero y por lo tanto es necesario seleccionar el fluido y su tratamiento en el área en particular [13].

A continuación, se presenta un resumen de las principales funciones del fluido de perforación (tabla 1).

Tabla 1. Principales funciones del fluido de perforación.

FUNCIONES	DESCRIPCIÓN
Limpiar el fondo del pozo y llevar los recortes a la superficie.	El fluido cuando entra la formación ejerce una acción de chorro que mantiene la superficie del fondo del agujero y las paredes del pozo limpios de recortes.
Controlar las presiones.	Generalmente la presión hidrostática es igual o mayor a la de la formación, para asegurar que los fluidos de perforación no fluyan dentro del pozo.
Enfriar y lubricar la broca y sarta de perforación.	La circulación del fluido de perforación enfría la broca y el conjunto de perforación, alejando este calor de la fuente y distribuyéndolo en todo el pozo.
Ayuda a soportar el peso de la sarta.	Debido al desplazamiento en el fluido de perforación, la sarta experimenta un efecto de boyancia o flotación, lo cual implica una reducción del peso que ha de soportar el equipo de perforación
Mantener la estabilidad del pozo.	el fluido de perforación debe de poder sostener y estabilizar las paredes del pozo mediante la formación de una pequeña capa de lodo, lisa, delgada, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible.
Suspender y descargar los recortes.	Un buen fluido de perforación debe tener propiedades que le permitan acarrear los recortes durante la perforación y soportarlos durante el tiempo que estuvo suspendida la misma, ya que si caen causaran problemas al ingresar tuberías nuevamente.
Transmisión de energía hidráulica a las herramientas y broca.	La energía hidráulica puede ser utilizada para maximizar la velocidad de penetración, mejorando la remoción de recortes en la broca.
Permitir la adquisición de información de la zona perforada.	Los fluidos de perforación se modifican con el propósito de mejorar el aspecto de evaluación de la formación.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

A lo largo de los años, un número considerable de tipos de fluidos de perforación se han desarrollado para adaptarse a diversas condiciones según las características y el lugar a perforar. La elección del mejor líquido para satisfacer las condiciones previstas minimizará los costos de los pozos y reducirán el riesgo de catástrofes tal como la pega de tubería de perforación, pérdida de circulación y golpes de gas, etc. [19], [20]. A continuación, se hace una descripción de los tipos de fluidos de perforación.

1.3.1 Fluidos base agua

1.3.1.1 Fluidos no dispersos Estos sistemas incluyen spud muds, lodos naturales y otros ligeramente tratados, estos sistemas generalmente son utilizados para perforar pozos superficiales. No se adicionan adelgazadores y dispersantes para dispersar los sólidos perforados y partículas de arcilla [13].

1.3.1.2 Fluidos dispersos A grandes profundidades, se requieren densidades altas o cuando las condiciones son problemáticas, entonces los fluidos requieren dispersarse, típicamente con lignosulfonatos, lignitos o taninos. Estos materiales y productos similares son defloculantes efectivos y reductores de filtrado. Se usan frecuentemente materiales químicos conteniendo potasio para proporcionar gran inhibición de lutitas. También se requiere usar materiales adicionales especializados para ajustar o mantener propiedades específicas del fluido [21].

1.3.1.3 Fluidos cálcicos Cationes divalentes como son calcio y magnesio, cuando se adicionan a fluidos de perforación de agua dulce, inhiben las formaciones de arcilla y lutitas hidratables. Se usan niveles altos de calcio soluble para controlar las lutitas desmoronables y agrandamiento del pozo y para prevenir el daño de la

formación. Los ingredientes principales de los sistemas cálcicos son la cal hidratada, yeso y cloruro de calcio [22].

1.3.1.4 Fluidos poliméricos Estos fluidos generalmente incorporan polímeros de alto peso molecular de cadena larga para encapsular los sólidos perforados, prevenir dispersión y cubrir las lutitas por inhibición, o para incrementar la viscosidad y reducen la pérdida de filtrado. Están disponibles varios tipos de polímero para estos propósitos, incluyendo acrilamida, celulosa y productos naturales a base de gomas. Frecuentemente se usan sales inhibidoras como KCl o NaCl para proporcionar gran estabilidad de la lutita. Muchos polímeros tienen limitaciones a temperaturas abajo de 300 °F, pero bajo ciertas condiciones pueden usarse en pozos con temperaturas de fondo de pozo considerablemente altas [21].

1.3.1.5 Fluidos de bajo contenido de sólidos Son sistemas en los que se controla la cantidad (en volumen) y tipo de sólidos. El contenido total de sólidos no es mayor de 6% a 10% en volumen. El contenido de sólidos arcillosos debe ser de 3% o menos y presentan una relación de sólidos perforados respecto a la bentonita de menos de 2:1. Los sistemas de bajos sólidos típicos usan aditivos poliméricos como viscosificantes o un entendedor de bentonita y no son dispersados. La ventaja principal de los sistemas de bajos sólidos es que mejoran significativamente las velocidades de penetración [13].

1.3.1.6 Fluidos de agua salada

- Los sistemas saturados con sal tienen una concentración de cloruros cercana a 190,000 mg/l (saturada) y se usan para perforar formaciones de sal.
- Sistemas de agua salada tienen un contenido de cloruros de 10,000 a 190,000 mg/l.
- Los sistemas de brackish o sistemas de agua de mar se refieren normalmente a sistemas de bajos niveles de sal.

- Los fluidos de agua salada normalmente se preparan con agua de mar o fuentes de agua producida.

Los fluidos se preparan con agua dulce o salmuera y cloruro de sodio seco (u otras sales como cloruro de potasio, el ion cloruro se usa para la inhibición de la lutita), cuando se adiciona sal se alcanza la salinidad deseada. Se usan varios productos especiales, como la atapulguita, almidón y algunos otros para incrementar la viscosidad del fluido, para mejorar las propiedades de limpieza del pozo y para reducir las pérdidas de fluido por filtración [21].

1.3.2 Fluidos de perforación aireados Los recortes son removidos mediante una corriente de aire o gas a una alta velocidad. Los sistemas aireados incluyen aire, gas, espumas o lodos aireados. Este tipo de fluidos se utilizan en zonas de presionadas, con gradientes de fractura muy bajos, y tienen una gran aplicación en la perforación bajo balance, ya que en este método de perforación se requiere una presión hidrostática que sea menor a la presión del yacimiento, y para lograr esto se le inyecta nitrógeno al lodo de perforación. Este fluido presenta una gran cantidad de desventajas, ya que para generar una correcta limpieza del agujero es necesario mantener una corriente de aire o gas constante que resulta en el uso de una gran cantidad de compresores, aumentando el costo, y los requerimientos de energía para hacerlos funcionar, también provocan diversas dificultades en el agujero ya que se erosiona el pozo con la corriente de gas, además de que al momento de toparse con formaciones húmedas las partículas que están siendo acarreadas por la corriente, forman anillos de lodo que pueden provocar el pegamiento de la tubería e incluso generar incendios, poniendo en peligro no solo al pozo, sino también la infraestructura y al equipo de trabajo [23].

1.3.3 Fluidos base aceite Los fluidos base aceite, se define como una mezcla de sustancias que cumple con determinados propiedades requeridas y establecidas previamente, para el funcionamiento de la perforación según las condiciones de

cada pozo, la fase continua es el aceite donde están suspendidos arcillas y cualquier otro sólido. Estos fluidos se usan para una variedad de aplicaciones donde la estabilidad e inhibición de fluidos son necesarias, tales como pozos de alta temperatura (> 200°F) y altas profundidades (> 16000 ft), formaciones poco consolidadas donde la estabilización del pozo es un problema. También se usa para recolección de muestras para análisis [24]. Los fluidos base aceite pueden ser 100% aceite y emulsiones inversas.

1.3.3.1 Características del aceite Los fluidos de perforación pueden ser formulados utilizando como fase continua una amplia variedad de aceites que deben tener entre otras las siguientes propiedades [25]:

- Peso específico: entre 28° y 36° API
- Punto de anilina: mayor a 155 °F con el propósito de evitar el deterioro prematuro de equipos con empaques o partes de goma.
- Punto de inflamación: mayor a 180°F para reducir los riesgos de incendio en el taladro
- Bajo punto de congelación, que permite su utilización en ambientes de extremo frío y calor.

1.3.3.2 Ventajas y desventajas de fluidos base aceite Algunas de las principales de las ventajas y desventajas de los fluidos base aceite son presentadas en la tabla 2 [25].

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los fluidos base aceite.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Buenas propiedades reológicas a temperaturas superiores a 500 °F.	Alto costo inicial.
Son más inhibidos que los lodos base agua.	Requiere control para evitar problemas de contaminación ambiental.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disminuyen los problemas de corrosión	Reduce la efectividad en la lectura de algunas herramientas de registros.
Características de lubricación superiores.	El tratamiento para remediar las pérdidas de circulación es más difícil.
Permite densidades bajas del lodo.	Dificulta la detección de patadas de gas debido a la solubilidad de este en el aceite.

Fuente: RODRIGUEZ, Eliserio. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga 2007.

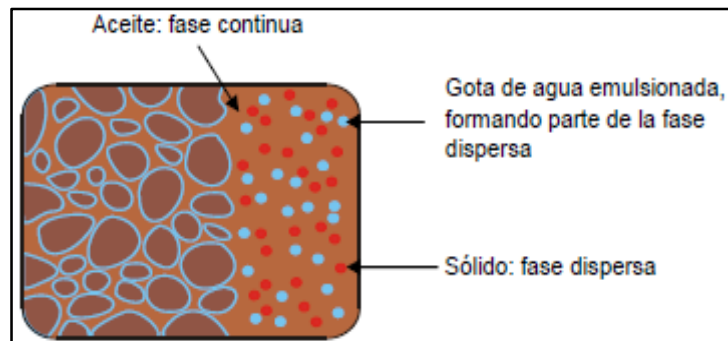
1.3.3.4 Fluidos 100% aceite Estos fluidos se utilizan generalmente 100% aceite, aunque en algunos casos puede contener, un poco de agua, no mayor al 5% en volumen y se usan principalmente para evitar la contaminación con agua de las formaciones productoras y para cortar núcleos, estos fluidos son inertes a la contaminación con H₂S, para formaciones de sal y anhidrita, además su formulación comúnmente con aceite crudo desgasificado, diésel, queroseno, aceite estabilizado, aceite crudo o mezclas de ellos. Generalmente se aplican para la terminación y reparación de pozos y se corre un gran riesgo de incendio debido a su inflamabilidad [27].

1.3.3.5 Emulsiones inversas Es una mezcla de agua en aceite a la cual se le agrega cierta concentración de sal para lograr un equilibrio de actividad entre el fluido y la formación, el agua no se disuelve o mezcla con el aceite, sino que permanece suspendida, actuando cada gota como una partícula sólida. En una buena emulsión no debe haber tendencia de separación de fases y su estabilidad se logra por medio de emulsificantes y agentes adecuados [13].

Una emulsión inversa, se caracteriza por la presencia de agua en aceite en la cual la fase dispersa es agua dulce o salada y la fase continúa es diésel, petróleo o alguna otra clase de aceite [25] como se observa en la figura 1.

Estas emulsiones trabajan con una relación aceite/agua que varía por lo general entre 60:40 y 90:10 y están formuladas con aceites, agua o salmueras, emulsionantes, viscosificantes, reductores de filtrado, gelantes, surfactantes y densificantes. Estas son muy estables a altas temperaturas y no les afectan las contaminaciones con anhidrita, sal y cemento.

Figura 1. Emulsión inversa



Fuente: PRIETO, Ali. Tecnología básica de los fluidos de perforación, manual técnico. Asesoría petrolera orientada, 2007.

- **Tipos de emulsiones inversas.**

A continuación, se hace una descripción de los tipos de emulsiones inversas.

Emulsión firme. Estos sistemas utilizan una alta concentración de emulsificantes y de agente controladores de filtrado para asegurar una máxima estabilidad de la emulsión y mínima pérdida de filtrado. Se emplea generalmente en áreas de alta temperatura (500°F) y su volumen de filtrado HP-HT es menor a 15 centímetros cúbicos [11].

Filtrado relajado. Contienen bajas concentraciones de emulsificantes y de agentes controladores de filtrado. El volumen de filtrado de lodo HP-HT es de 15 a 20 centímetros cúbicos y son estables a temperaturas menores de 325°F [11].

De alto contenido de agua. Estos fluidos fueron desarrollados para cumplir ciertas reglamentaciones ambientales con la cantidad de aceite adherido a los recortes de perforación que se descargan a fuente como agua de mar [11].

- **Aplicaciones más comunes de las emulsiones inversas [18]**
 - Perforar lutitas problemáticas utilizando el concepto de actividad balanceada.
 - Prevenir pérdidas de circulación en formaciones con bajo gradiente de presión.
 - Perforar pozos con alto gradiente de temperatura.
 - Perforar huecos direccionales.
 - Perforar formaciones de gases ácidos.
 - Perforar formaciones de anhidrita o de yeso.
 - Prevenir atascamiento de tubería.
 - Minimizar problemas de torque y arrastre.

2. BIODIESEL

El biodiesel como objeto de estudio es definido por la American Society for Testing Materials (ASTM) como esteres mono alquílicos de ácidos grasos (FAME), por sus siglas en inglés, de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas animales, se presenta en estado líquido, y que sus propiedades similares al diésel combustible pueden ser utilizado como sustituto natural del petróleo diésel [28].

2.1 OBTENCIÓN DE BIODIESEL

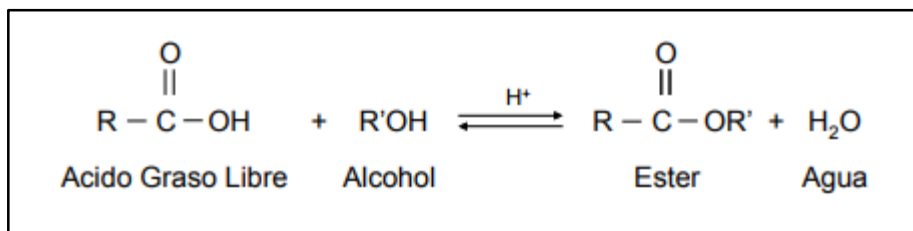
Actualmente uno de los métodos más empleados en la industria para la producción de biodiesel consiste en la transesterificación de los triglicéridos presentes en aceites vegetales y/o grasas animales con alcoholes de cadena corta, en presencia de un catalizador con características químicas ácidas o básicas, y que puede estar en fase homogénea o heterogénea. De esta manera se obtiene una mezcla de esteres alquílicos (Biodiesel) y glicerol. La reacción de transesterificación es una reacción de equilibrio, en la cual, el triglicérido (TAG) es convertido paso a paso a diglicérido, monoglicérido y finalmente a glicerol [29]. Además, de los catalizadores tradicionales básicos y ácidos, se pueden encontrar catalizadores muy variados como lo son azúcares, lipasas, resinas de intercambio iónico, zeolitas entre otros materiales heterogéneos [30].

2.1.1 Pretratamientos para la obtención de biodiesel El índice de acidez es un factor indicativo clave en la obtención de biodiesel, ya que a mayor cantidad de ácidos grasos libres se pueden formar jabones cuando reaccionan con el catalizador de la transesterificación, lo que lleva a un menor rendimiento en la producción de

biodiesel, además un alto índice de acidez afecta directamente en la calidad del biodiesel, debido a esto, se realizan tratamiento para disminuir esta propiedad antes de llegar la obtención de biodiesel [31] [8]. Algunos de los más utilizados se mencionan a continuación.

2.1.1.1 Esterificación Es una de las reacciones más utilizadas como etapa de pretratamiento a la transesterificación, el objetivo de esta reacción es convertir los ácidos grasos libres, en esteres, en presencia de un catalizador ácido H_2SO_4 y ocurre entre una grasa animal y un alcohol de cadena corta (Figura 2), generalmente metanol, que reacciona rápidamente, debido a que son moléculas pequeñas y no tienen cadenas ramificadas que dificulten el proceso [32].

Figura 2. Reacción de esterificación.

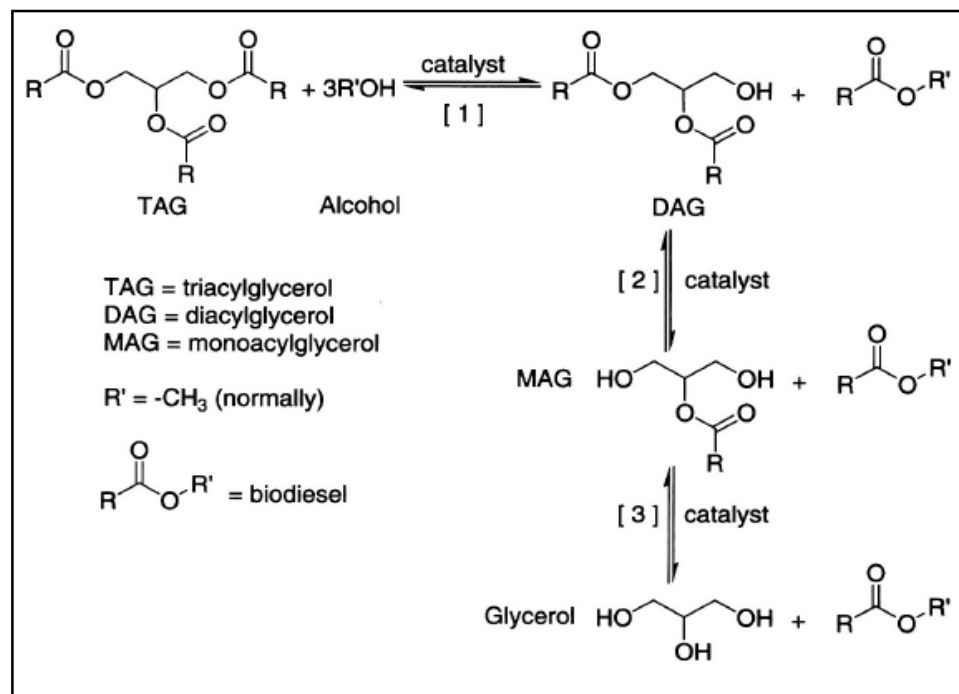


Fuente: MOLINERO, Laura. Producción de monoglicéridos por esterificación de glicerina con ácidos cinámico y p-metoxicinámico, Madrid, 2012.

2.1.2 Transesterificación El proceso de transesterificación, denominado alcoholólisis, es el desplazamiento de un alcohol éster por otro alcohol como en una hidrólisis reacción, utilizando alcohol en lugar de agua. Los alcoholes adecuados son metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico. El metanol es el más común utilizado, debido a su bajo costo y buenas propiedades fisicoquímicas. La transesterificación de aceites (Figura 3) reduce la viscosidad de los triglicéridos, y también mejora las propiedades físicas del producto final (número de cetano, eficiencia de la inyección), resultando en un mejor combustible. Los ésteres metílicos de ácidos grasos obtenidos por la transesterificación pueden emplearse

directamente, y con una eficiencia energética similar a la del petróleo diésel. La transesterificación implica varias reacciones consecutivas (Schwab et al., 1987). Un triglicérido se transforma sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y, finalmente, en glicerol. Los resultados obtenidos varían según las condiciones de tiempo de reacción, relación aceite: alcohol, tipo de catalizador, temperatura del procedimiento, etc [33].

Figura 3. Mecanismo de Transesterificación. [33]



Fuente: MOSER, Bryan. Biodiesel production, properties, and feedstock. In Vitro Cellular & Developmental Biólogo 2009, Vol. 45, No. 3, pp 229-266

2.1.2.1 Transesterificación ácida La transesterificación de triglicéridos se cataliza por ácidos inorgánicos, tales como ácido sulfúrico, fosfórico, ácido clorhídrico y ácidos orgánicos sulfonados. Este proceso catalítico produce bajas conversiones, ritmo lento y más de un día para llegar a la conversión es necesaria. Un exceso de alcohol aumenta la conversión, pero hace la recuperación de glicerol más

complicada. Por lo tanto, la optimización es necesaria para encontrar la mejor relación entre el alcohol y la materia prima. Este proceso es, sin embargo, el más apropiado para los triglicéridos con un alto contenido en ácidos grasos libres y agua [34].

2.1.2.2 Transesterificación alcalina Utiliza catalizadores alternativos para convertir los triglicéridos en biodiesel, se utiliza principalmente hidróxidos de sodio y potasio. Este tipo de catálisis son recomendables para transesterificar aceites vegetales, animales, crudos o refinados o incluso aceites de cocina.

En la actualidad, la síntesis de biodiesel se está llevando a cabo utilizando estos catalizadores alcalinos, ya que las tasas de reacción son mayores (incluso 4000 veces) que la catálisis ácida [34].

2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIODIESEL FRENTE AL DIÉSEL

2.2.1 Estabilidad oxidativa Se refiere a la vida útil del combustible/biocombustible, a través del tiempo, siendo esta la causa de cambios importantes del deterioro de los biocombustibles debido a su origen vegetal o animal, si se compara con el combustible derivado del petróleo. Factores como contacto con aire, cambios de temperatura, radiación, bacterias, hacen que los biocombustibles tengan una mayor degradación y puede generar gomas con el correr del tiempo, lo que podría desencadenar problemas al precipitar y obstruir conductos durante su funcionamiento [35].

2.2.2 Emisiones más bajas de biodiesel La combustión de biodiésel por sí solo proporciona una reducción de más del 90% en el total de combustibles no quemados hidrocarburos y una reducción del 75 al 90% en hidrocarburos aromáticos policíclicos. El biodiesel también proporciona reducciones significativas

en las partículas y el monóxido de carbono que el combustible diésel de petróleo. El biodiesel produce un ligero aumento en óxidos de nitrógeno dependiendo de la familia del motor y los procedimientos de prueba. Muchos estudios sobre los resultados y las emisiones de ignición por compresión motores diésel, alimentados con biodiesel puro y mezclas con gasoil, se han y se informan en la literatura (Laforgia et al., 1994, Cardone et al., 1998). Los datos de caracterización del combustible muestran algunas similitudes y diferencias entre el biodiesel y los combustibles de petrodiesel (Shay, 1993). El contenido de azufre del petrodiesel es de 20 a 50 veces la del biodiesel [36].

2.2.3 Problemas a bajas temperaturas Uno de los mayores problemas que se encuentran a la hora de decidir el uso de biodiesel como combustible son las malas propiedades que presenta a bajas temperaturas. Algunas de ellas son: Punto de nube, punto de vaciado, punto de congelación; que generalmente son mucho mayores a las del diésel y se puede presentar problemas operacionales [37].

2.2.4 Disponibilidad y renovabilidad del Biodiesel El biodiesel es el único combustible alternativo en el que la mezcla Diésel/Biodiesel funciona en motores convencionales no modificados. Puede almacenarse en cualquier lugar donde se almacene el diésel del petróleo. El biodiesel se puede hacer de productos renovables como la soya, la colza y el girasol entre otros, además las propiedades del biocombustible lo hacen tener menos riesgos en manipulación, transporte y almacenamiento comparado con el diésel, debido a un mayor punto de inflamación [36].

2.2.5 Viscosidades más altas del Biodiesel La viscosidad cinemática del biodiesel es mayor que el biodiesel, debido a que su masa molecular y una más larga estructura química, las altas viscosidades pueden afectar el volumen de flujo y la inyección en el motor, en general a bajas temperaturas compromete la integridad mecánica del sistema [38].

El uso de biodiesel en motores diésel de inyección directa está limitada por algunas de sus propiedades físicas. Los altos valores de viscosidad dan lugar a una baja combustión, combustión incompleta y deposición de carbono en los inyectores, además se necesita más energía para poder bombear el fluido. Por lo tanto, la viscosidad del biodiesel debe ser baja [39].

2.3 DIFERENCIAS ENTRE EL DIESEL Y BIODIESEL

En la tabla 3 se presenta una comparación de las características del diesel y biodiesel.

Tabla 3. Comparación de las características del diesel y biodiesel.

CARACTERÍSTICA	DIESEL	BIODIESEL
Densidad	Menor	Mayor
Viscosidad	Menor	Mayor
Punto de relampagueo	Menor	Mayor
Punto de inflamación	Menor	Mayor
Punto de fluidez	Menor	Mayor
Poder calorífico	Mayor	Menor

2.4 GRASA DE POLLO COMO MATERIA PRIMA POTENCIAL PARA BIODIESEL

A nivel mundial, la materia prima más común para la producción de biodiesel es el aceite vegetal refinado. El primer inconveniente con estas materias primas de origen vegetal (aceites de soja, colza, canola, girasol etc), es su relativo alto costo, el cual representa del 70-85% del presupuesto total en la producción de biodiesel, haciendo al biodiesel de origen vegetal no competitivo económicamente frente al petrodiesel [40]. El principal problema que frecuentemente enfrenta la industria del biodiesel es la disponibilidad de materia prima de alta calidad, abundante y barata. En

consecuencia, la búsqueda de materias primas alternativas es considerada una necesidad para la industria [41].

Una posible solución a este problema es la utilización de grasas residuales producidas de las industrias agrícolas, las cuales representan un problema ambiental considerable por la contaminación de fuentes hídricas y su descomposición afectan la salud humana, grasas como sebos bovinos no comestibles, manteca de cerdo y grasa aviar. Estas materias primas podrían ser adecuadas para dicho proceso [42].

Estudios previos hechos por otros autores y en el grupo INTERFASE de la escuela de ingeniería química de la Universidad Industrial de Santander, han demostrado que la grasa de pollo es una materia prima favorable para la producción de biodiesel debido a su bajo costo. Entre los factores que dominan la viabilidad económica de la producción de biodiesel se incluyen, el costo de la grasa o el aceite y el rendimiento alcanzado a partir de estas materias primas [8].

2.5 COSTOS DEL BIODIESEL

Es importante resaltar que en este trabajo no se realizó un estudio económico debido a que la empresa que suministró la materia prima no facilitó la información requerida, entre esto; costos de producción de la materia prima, volumen de producción, alternativas de disposición etc.

En este apartado se quiere dar a conocer de forma general un análisis de costos en la producción del biodiesel de soya, realizado por Muñoz y Manrique [4] en su tesis de pregrado.

2.5.1 Costos biodiesel de soya El sistema base aceite emulsión inversa como fase continua Diesel es más económico que los sistemas base Biodiesel De Soya, porque la fase continúa del mismo tiene un menor costo.

El costo por barril del fluido base aceite como fase continua Diesel es de 160 US\$/bbl. Asimismo, el costo por barril del sistema cuya fase continúa es Biodiesel de Soya es 285 US\$/bbl. Representando una diferencia de 125 US\$/bbl entre ambos fluidos [4]. En las tablas 4 y 5 están especificados los costos por barril de las dos formulaciones fase continua Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente.

Tabla 4. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W. Fase continua Diesel No. 2

1 bbl del fluido de base	Relación: 70/30 O/W					
	Densidad:9 lpg					
Aditivo	Concentración	Unidad (según pedido mínimo)	Cantidad mínima compra	Cantidad real	US\$ valor unitario	Costo por barril (US\$/bbl)
Diesel Nº 2	0,62 bbl	Galón	1 Gal	26	4,38	113,88
Agua	0,27 bbl	-	-	-	-	-
CaCl ₂	23,36 lb/bbl	80,02 lb/scs	1 scs	0,292	26,69	7,79
Q' Mul 1	0,96 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,017	557,04	9,47
Q' Mul 2	0,19 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,003	612,62	1,84
Gilsonita HT	8 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,160	70,57	11,29
Q' Mul Gel	3 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,060	69,06	4,14
Cal	4 lb/bbl	55 lb/scs	1 scs	0,073	15,08	1,10
Barita	51,46 lb/bbl	100 lb/scs	1 scs	0,515	20,1	10,35
					Costo por barril (US\$/bbl)	160

Fuente: MUÑOZ HERNANDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CARDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2012.

Tabla 5. Costo por barril emulsion inversa 70/30 O/W. Fase continua Biodiesel de soya.

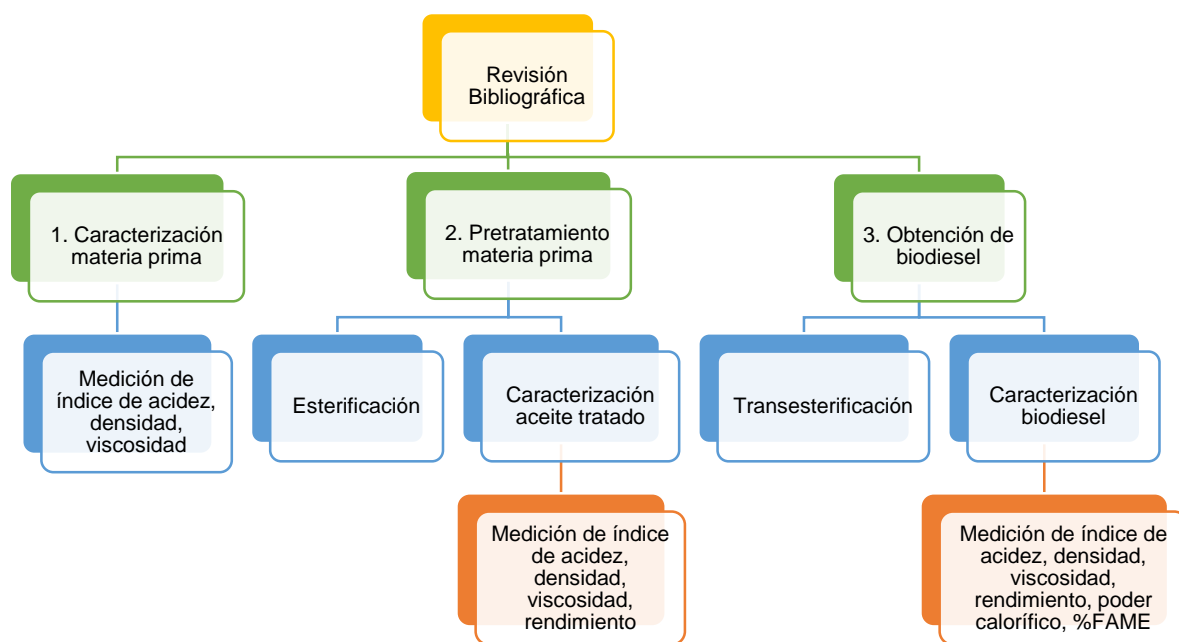
1 bbl del fluido base	Relación 70/30 O/W					
	Densidad: 9 lpg					
Aditivo	Concentración	Unidad	Cantidad mínima compra	Cantidad real	US\$	Costo por barril (US\$/bbl)
Biodiesel de soya	0,63 bbl	Galón	1 Galón	27	8,9	240,30
Agua	0,27 bbl	-	-	-	-	-
CaCl₂	23,49 lb/bbl	80,02 lb/scs	1 scs	0,294	26,69	7,85
Q Mul 1	0,96 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,017	557,04	9,47
Q Mul 2	0,19 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,003	612,62	1,84
Gilsonita HT	8 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,160	70,57	11,29
Q Mul gel	3 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,060	69,06	4,14
Cal	4 lb/bbl	55 lb/scs	1 scs	0,073	15,08	1,10
Barita	44,32 lb/bbl	100 lb/scs	1 scs	0,443	20,10	8,90
				Costo por barril (US\$/bbl)		285

Fuente: MUÑOZ HERNANDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CARDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2012.

3. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL BIODIESEL

En la figura 4 se presenta la metodología y etapas de investigación para la obtención de biodiesel.

Figura 4. Diagrama de las etapas de investigación.



3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en esta investigación fue suministrada por la empresa MAC POLLO S.A., la cual corresponde a un residuo del proceso de sacrificio y optimización del ave de distribución.

3.1.1 Propiedades físicas. La densidad del aceite aviar se midió utilizando el método del picnómetro (2ml), teniendo como sustancia de referencia el agua; la viscosidad fue medida en el equipo BROOKFIELD PROGRAMMABLE DV-III+RHEOMETER con punta SC4-18 a temperatura ambiente.

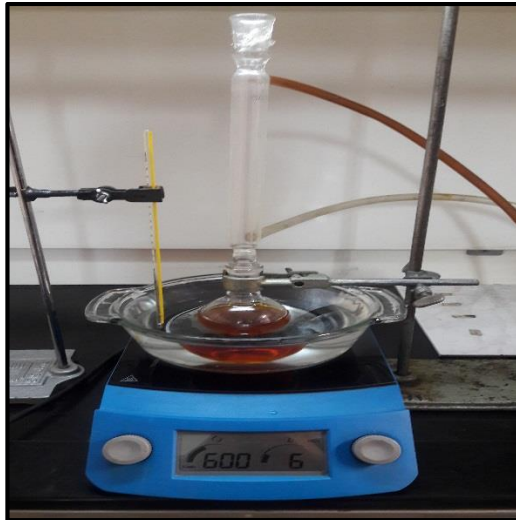
3.1.2 Propiedades químicas Se determinó el índice de acidez [mg KOH/g aceite], según la norma UNE EN ISO 660 (anexo A).

3.2 PRETRATAMIENTO MATERIA PRIMA.

Con la finalidad de reducir el índice de acidez, impurezas y otros componentes del aceite aviar, fue necesario realizar una reacción de esterificación bajo las condiciones determinadas en el estudio realizado por RAMIREZ, Y. [43].

3.2.1 Esterificación ácida. La reacción de esterificación se realizó en balones fondo plano de 500ml, y se hicieron cálculos estequiométricos (ver anexo B) para hallar la cantidad de metanol y catalizador a utilizar, según la relación alcohol:aceite. Las condiciones determinadas para este pretratamiento fueron: relación molar alcohol:aceite de 7,5:1, concentración de catalizador H_2SO_4 1,25% p/p, temperatura de 60°C, tiempo de reacción 150 minutos, con agitación magnética constante y reflujo para evitar pérdidas de metanol por evaporación, este montaje se muestra en la figura 5.

Figura 5. Montaje reacción de esterificación.



Transcurrido el tiempo de reacción, la mezcla es llevada a un embudo de decantación por 2 horas, donde se elimina la fase líquida superior (ver anexo C) y se realizan 5 lavados al 30% (v/v) con agua destilada a 90°C al aceite (fase inferior), luego es secado a una temperatura de 90°C por 60 minutos y por último se realiza la medición de índice de acidez según la norma UNE EN ISO 660.

3.2.2 Caracterización de aceite esterificado. Con el objetivo de comparar las propiedades del aceite esterificado con el aceite aviar se realizaron mediciones de densidad y viscosidad siguiendo el método descrito en el apartado 3.1.1 y el índice de acidez según la norma UNE EN ISO 660. Además, se calculó el porcentaje de rendimiento (aceite esterificado/aceite aviar).

3.3 OBTENCIÓN DE BIODIESEL

Para la producción de biodiesel se esterificaron 2100 g de aceite aviar, según lo especificado en el apartado 3.2.1.

3.3.1 Reacción de transesterificación alcalina. La reacción de transesterificación se realizó en un balón de fondo plano de 500ml, se hicieron cálculos estequiométricos (ver anexo D) para hallar la cantidad de metanol y catalizador a utilizar, según la relación molar alcohol:aceite. Las condiciones establecidas fueron: relación molar alcohol:aceite de 6:1, concentración de catalizador KOH 0,5% p/p, temperatura de 60°C, tiempo de reacción 120 minutos con agitación magnética constante y reflujo para evitar pérdidas de metanol por evaporación. Estas condiciones se eligieron según el estudio realizado de manera simultánea por Rojas y Dueñas [44] en el grupo de investigación INTERFASE de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander; tomando como parámetros de selección la cantidad de reactivos a utilizar, el alto valor comercial del metanol y viscosidad (ver anexo E); teniendo en cuenta que la finalidad del biodiesel obtenido es ser aplicado como fase continua en los fluidos de perforación de emulsión inversa.

Después de transcurrida la reacción, se llevó el aceite a un embudo de decantación por 20 horas, se separó la glicerina del biodiesel (ver anexo C) y se procedió a realizar los lavados, 2 con agua acidulada a una concentración de 2ml de ácido fosfórico al 10% (p/p)/litro y 3 con agua destilada, finalmente es secado a 105°C por 150 minutos, para eliminar el agua remanente, para luego ser pesado y almacenado [7].

3.3.2 Caracterización del biodiesel Con la finalidad de comparar las propiedades del biodiesel obtenido con el aceite esterificado se realizaron mediciones de densidad, índice de acidez, viscosidad siguiendo el método descrito en el apartado 3.1.1. y el %FAME según la norma EN 14103 (ver anexo F), con un cromatógrafo de gases AGILENT TECHNOLOGIES 7890A GC SYSTEM, con un detector FID utilizando el método descrito en el anexo G; Además, se calculó el porcentaje de rendimiento (biodiesel/aceite esterificado).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El aceite residual aviar suministrado por la empresa MAC POLLO S.A., no presenta apariencia grumosa, es de color café, y de olor característico. La materia prima es producto de la separación de líquidos y sólidos de los tratamientos de lavado y desinfección de las aves tratadas.

4.1.1 Propiedades físicas y químicas del aceite aviar En la tabla 6 se presentan los resultados de las mediciones de índice de acidez, densidad, viscosidad, y se comparan con otros estudios reportados en la literatura.

Tabla 6. Comparación de las propiedades del aceite aviar con otros estudios.

Autor	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad [mm ² /s]	IA [mg KOH/g aceite]
Diaz K. [8]	893,4	336	10,75
Ramirez I. [45]	907,4	42,9	6,60
Galeano C. [46]	934,2	43,38	0,36
Abdul M. [47]	930	30	0,16
Sankar S. [48]		41,66	4,75
Rojas I. [44]	919,25	67,84	4,31
Este estudio	927,46	62,36	4,03

En la tabla 6 se observa que las propiedades fisicoquímicas en este estudio reportan valores diferentes comparados con la bibliografía referenciada. El valor de índice de acidez obtenido a pesar de ser menor que otros presentados en trabajos anteriores [8, 44], indica que siendo de mejor calidad, es necesario realizar un pretratamiento para reducir esta propiedad, debido a que cuando la materia prima presenta valores de acidez mayores a 2 mg KOH/g aceite, no es recomendable realizar la

transesterificación de forma directa, ya que a mayor cantidad de ácidos grasos libres se pueden formar jabones cuando estos reaccionan con el catalizador, lo que lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel [8,9].

Las diferencias en el índice de acidez del presente estudio, con respecto a la bibliografía consultada pueden deberse a la interacción de la materia prima con el medio ambiente, a las condiciones climatológicas que fue sometida, al proceso de obtención y a la genética de las aves [8].

La viscosidad presentada por el aceite en este estudio muestra valores bajos, comparados con las trabajadas en el grupo de investigación [8,44], propiedad muy importante para el desarrollo y la aplicación en fluidos de perforación, donde se busca que el aceite agregado tenga valores bajos de viscosidad y cercanos al diesel, que es el fluido de referencia y empleado en la mayoría de emulsiones inversas.

4.2 PRETRATAMIENTO MATERIA PRIMA.

4.2.1 Esterificación ácida En la tabla 7 se presentan los resultados de cada corrida de aceite aviar, detallando el índice de acidez y rendimiento para cada una.

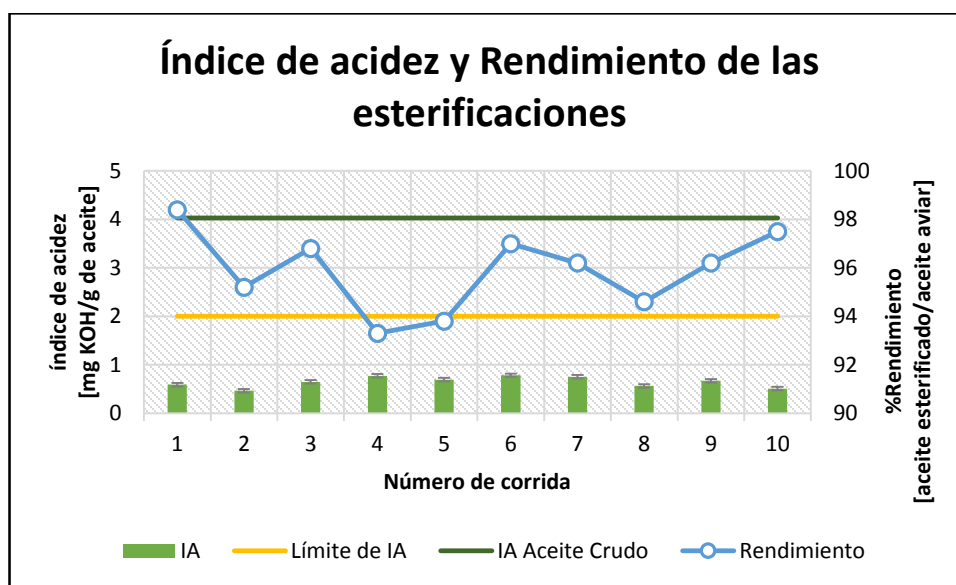
Tabla 7. Resultados de las esterificaciones.

Corrida	Aceite aviar [g]	IA [mg KOH/g aceite]	Rendimiento [aceite tratado/aceite aviar]
0	Aceite aviar	4,034	
1	300,01	0,591	98,4
2	300,02	0,465	95,2
3	300,04	0,647	96,8
4	300,01	0,773	93,3
5	300,02	0,693	93,8

Corrida	Aceite aviar [g]	IA [mg KOH/g aceite]	Rendimiento [aceite tratado/aceite aviar]
6	300,03	0,785	97,0
7	300,01	0,753	96,2
8	300,02	0,563	94,6
9	300,05	0,669	96,2
10	300,03	0,508	97,5

Se realizaron 10 corridas al aceite aviar, con un rendimiento promedio de 95,9%, donde se observó que el índice de acidez no presentó variación significativa en cada prueba y los valores estuvieron por debajo del rango recomendado para la transesterificación. En la figura 6 se muestran los resultados de índice de acidez y rendimiento para cada corrida

Figura 6. Índice de acidez y rendimiento de las esterificaciones.



Con estos resultados se corrobora que las condiciones encontrada por Ramirez, Y. [43], tiene total reproducibilidad en cuanto al índice de acidez y además se obtienen altos valores de rendimiento.

4.2.2 Caracterización del aceite esterificado Se realizó la caracterización al aceite esterificado, con el fin de identificar y comparar el cambio en sus propiedades, con respecto al aceite aviar; esta variación se muestra en la tabla 8 y en la figura 7.

Tabla 8. Comparación de propiedades del aceite aviar y aceite esterificado.

Propiedad	Aceite aviar	Aceite esterificado
Índice de acidez [mg KOH/g aceite]	4,033	0,694
Viscosidad (25°C)	62,36	49,45
Densidad kg/m ³	927,46	1022,1
Estado	Líquido	Líquido
Color	Café	Rojo cobrizo

Figura 7. Comparación de los cambios físicos presentados por el aceite aviar y aceite esterificado.



4.3 OBTENCIÓN DE BIODIESEL

4.3.1 Reacción de transesterificación. Previo a la ejecución de las reacciones se obtuvieron 2877 g de aceite esterificado con 95,9% de rendimiento y un índice de acidez 0,694 mg KOH/g aceite. Los resultados de las pruebas son presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de las transesterificaciones.

Corrida	Aceite esterificado [g]	Rendimiento [biodiesel/aceite esterificado]
1	300,02	89,6
2	300,04	98,6
3	300,01	96,9
4	300,05	98,2
5	300,04	95,2
6	300,03	95,4
7	300,02	86,5
8	300,01	95,6
9	300,04	93,1
10	176,74	94,6

Se realizaron 10 corridas de transesterificación, donde se obtuvo un rendimiento promedio de 94,4% con respecto al aceite esterificado, la cantidad de biodiesel producido fue aproximadamente de 2,4 litros, este fue caracterizado y empleado en la formulación de fluidos de perforación.

4.3.2 Caracterización Biodiesel. Se obtuvieron 2715 g de biodiesel, con un rendimiento de 94,4% biodiesel/aceite esterificado y de 90,5% biodiesel/aceite aviar. En la tabla 10 se comparan las propiedades del aceite aviar, con el aceite esterificado y el biodiesel obtenido, además, este último se compara con los límites establecidos en la norma EN 14214.

Tabla 10. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del aceite aviar, aceite esterificado y biodiesel comparado con la norma EN 14214.

Propiedad	Aceite aviar	Aceite esterificado	Biodiesel 6:1, 0,5% KOH	Norma EN 14214
Densidad [kg/m ³]	927,46	1022,10	977,95	860-900
Viscosidad 25°C [mm ² /s]	62,36	49,45	5	3,5-5
Índice de acidez [mg KOH/g aceite]	4,03	0,69	0,08	0,5 máximo
FAME	-	-	98,56	96,5 mínimo
Poder calorífico [MJ/Kg]	-	-	39,73	-
Color	Café	Rojo cobrizo	Amarillo brillante	-

Se observó que el valor de densidad de biodiesel no cumple con lo establecido en la norma EN 14214, lo que influye notablemente en la calidad del biodiesel producido, debido a que si la mayoría de las cadenas de los ácidos grasos constituyentes de los triglicéridos (en el aceite) son largas (> C16), la densidad del biocombustible aumentará proporcionalmente, generándose así problemas de fluidez [46].

Sin embargo, este resultado no es desfavorable en este estudio, debido a que la aplicación del biodiesel obtenido es la formulación de fluidos de emulsión inversa donde se requieren altas densidades y bajas viscosidades.

La viscosidad del biodiesel cumple con lo exigido por la norma y presentó una reducción significativa en cada etapa del tratamiento debido a la eliminación de esteres y glicerina, donde estos fueron reemplazados por un alcohol más ligero, en este caso metanol, formando así moléculas pequeñas con viscosidad similar al diesel [7]. Este resultado es favorable en este estudio debido a que los principales

problemas en trabajos similares y anteriores, se debió a la alta viscosidad del fluido agregado [5].

La reducción de índice de acidez se debe a la eliminación de ácidos grasos libres presentes en el aceite, llevado a cabo en la etapa de tratamiento y transesterificación, además, se obtuvo un valor muy por debajo del exigido por la norma, lo que indica que se obtuvo un biodiesel de buena calidad y con mayor resistencia a la degradación [49].

El alto porcentaje de FAME obtenido, se debe a las recomendaciones realizadas en estudios previos por el grupo de investigación INTERFASE, y además se demostró la reproducibilidad en cada etapa, siguiendo las condiciones planteadas, obteniendo resultados superiores a los establecidos por la norma, lo que indica que está formado en su mayoría por metilesteres, componente de propiedades similares al diesel. Este resultado es favorable para esta investigación debido a que el fluido empleado en las formulaciones inversas es generalmente diesel.

El poder calorífico reportado en este estudio fue de 39,73 [MJ/Kg], comparado con otros estudios como el de Martínez G. [50], quien reporta un poder calorífico para biodiesel a partir de grasa de pollo de 42,68 [MJ/Kg] y Abraham J. [51] reporta un valor de 38,71 [MJ/Kg] menor al poder calorífico del diesel convencional [51], que es 42,42 [MJ/Kg], lo que indica que este valor se podría mejorar. En la figura 8 se hace una comparación visual del aceite aviar, esterificado y biodiesel.

Figura 8. Comparación de los cambios físicos presentados por el aceite aviar, esterificado y transesterificado (biodiesel).



En la figura 8 se evidencia un cambio significativo de apariencia según el tratamiento realizado hasta llegar al producto final, esto debido a la variación de los parámetros anteriormente analizados, entre ellos índice de acidez, reducción de viscosidad y alto contenido de metilésteres.

5. FORMULACIÓN DE FLUIDOS DE EMULSIÓN INVERSA UTILIZANDO BIODIESEL DE ACEITE RESIDUAL AVIAR COMO FASE CONTINUA

La iniciativa principal de realizar un estudio experimental para determinar la factibilidad de utilizar el aceite residual aviar transesterificado como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa, es hallar una aplicación para los grandes volúmenes de aceite residual aviar que se obtienen debido a la creciente producción del sector avícola a nivel nacional, al tiempo que se amplía la gama de alternativas para la fase continua en los fluidos de perforación de emulsión inversa y se reconoce la importancia de las tecnologías alternativas.

En este estudio se realizaron pruebas necesarias para caracterizar el biodiesel y diesel (aceite comúnmente utilizado en lodos de perforación base aceite) en el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, luego se prepararon lodos con diferentes formulaciones en el laboratorio de lodos y cementos de dicha escuela.

5.1 ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE SUSTITUTOS DE LA FASE CONTINUA EN LODOS DE EMULSIÓN INVERSA

Mediante revisión bibliográfica se pudo establecer que se han realizado investigaciones en la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, donde se han utilizado como posibles sustitutos del diesel aceites vegetales tales como el aceite de palma, la glicerina, aceite mineral blanco grado técnico y, además, biodiesel a base de palma y de soya. A nivel internacional se conocen estudios con diversos aceites vegetales como la soya, el ajonjolí y otros más cuya tendencia es la misma de este estudio.

En la universidad Industrial de Santander, se han realizado los siguientes estudios:

5.1.1 Estudio de la factibilidad del uso del aceite de palma como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa

Autores: ACOSTA GONZALES SERGIO Y RUEDA VARGAS GERMÁN

Este proyecto fue realizado en el año 2002 bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza León, cuyas conclusiones fueron:

- La viscosidad del lodo preparado con aceite de palma resulta ser excesivamente viscoso.
- La viscosidad para los tipos de lodos aumenta cuando la cantidad de agua en la fase dispersa es mayor. El agua, al estar emulsificada y sus partículas tener tamaño miscelar, se comporta como un sólido.
- El aceite de palma es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, sin embargo, la incompatibilidad con la cal no hace factible su utilización en lodos de perforación debido que hasta el momento no se conoce un producto comercial que reemplace la cal en la formulación del lodo base aceite.
- La solidificación progresiva del aceite de palma con el paso del tiempo hace pensar que el almacenamiento del lodo para su utilización en la perforación de otros pozos no es recomendable.

5.1.2 Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa

Autores: BERNA ARTEAGA TATIANA Y ILIAS MEGAREJO IBIS

Este proyecto fue llevado a cabo en el año 2008 bajo la dirección del profesor. Emiliano Ariza, donde se llegó a las siguientes conclusiones:

- Técnicamente, no es factible el uso de la glicerina cruda, producto del proceso de transesterificación del aceite de palma para la obtención de biodiesel, como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.
- En los análisis de viscosidad las formulaciones preparadas con glicerina resultan ser excesivamente viscosas.
- Los filtrados obtenidos en las pruebas de HPHT son muy altos, independientemente de la cantidad y del controlador de filtrado empleado.
- La glicerina es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, sin embargo, la cantidad de aire que queda atrapada dentro de los lodos que se preparan con dichos aditivos no hace factible su uso en fluidos de perforación, debido a que ningún antiespumante empleados fue capaz de eliminar tal cantidad de aire.

5.1.3 Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa

Autores: BENAVIDES AYALA FABIO Y GOMEZ QUINTERO JIMMY

Este proyecto fue llevado a cabo en el año 2010 bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza, cuyas conclusiones fueron:

- Desde el punto de vista técnico es factible emplear como fase continua en lodos de emulsión inversa el Biodiesel y aunque la viscosidad es mayor que la base Diesel, presenta buenas propiedades para lodos de perforación.

- El Biodiesel es compatible con todos los aditivos empleados en este proyecto, pues ninguno presenta precipitaciones o reacciones que demuestren lo contrario.
- La viscosidad para los dos tipos de lodos aumenta cuando aumenta la cantidad de agua en cada formulación, y este aspecto genera un comportamiento pseudoplástico ideal en los lodos con mayor cantidad de agua.
- Los lodos de emulsión inversa base Biodiesel presenta excelentes propiedades de limpieza de pozo, aún mejor que los lodos base Diesel, lo que nos genera una ventaja adicional.

5.1.4 Factibilidad técnica y económica del uso de biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa

Autores: MUÑOZ HERNANDEZ OSCAR Y MANRIQUE CARDENAS JORGE

Este proyecto fue realizado en el año 2012 bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza, cuyas conclusiones fueron:

- Técnicamente, es factible el uso del Biodiesel de soya, como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. El lodo propuesto para este fin bajo distintas formulaciones (salvo 40/60 Alto contenido de agua) cumple las perspectivas esperadas. El sistema exhibió viscosidades plásticas bajas y estabilidad en la reología, sus tortas delgadas pueden llegar en campo a reducir la posibilidad de una pega de tubería, o de suaveo (swabbing). Las pérdidas de filtrado del Biodiesel de soya se encuentran dentro de los parámetros permisibles en los lodos base aceite (< 6ml), ello ratifica la eficiencia de este sistema para regular los volúmenes de filtrados ante condiciones de alta presión y alta

temperatura. Estas características lo postulan como un reemplazo creíble de la fase continua en lodos de emulsión inversa.

- En la formulación de Biodiesel soya alto contenido de agua 40/60, los análisis de viscosidad de dicha formulación resultan ser excesivamente viscosos. Los filtrados obtenidos en las pruebas de “HPHT” son muy altos, independientemente de la concentración y tipo de controlador de filtrado empleado.
- El Biodiesel de Soya es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, pues ninguno presenta precipitaciones o reacciones que demuestren lo contrario.

5.1.5 Factibilidad del uso de aceite mineral blanco grado técnico como fase continua en lodos de perforación

Autores: GONZALES GONZALES JOSE Y MATTA ARIZA GABRIEL

Este proyecto fue realizado en el año 2014 bajo la dirección de M.sc. Cesar Pineda, cuyas conclusiones fueron:

- El aceite resulta ser incompatible con varios aditivos utilizados en la formulación de los lodos base aceite lo cual genera que se creen precipitaciones y los agregados no generen las propiedades y características que debe tener el lodo para que realice un trabajo eficaz durante la perforación.
- El aceite mineral Blanco Grado Técnico Blanco, resultó técnicamente no ser factible para ser empleado como fase continua en la formulación de lodos Base Aceite.

- El aceite en estudio desarrolla viscosidades altas a velocidades de corte altas cuando estas deben ser bajas y a velocidades de corte bajas desarrolla bajas viscosidades cuando lo que se requiere es que estas sean altas.
- A velocidades de corte altas el fluido preparado a partir de aceite mineral blanco grado técnico presenta viscosidades excesivas lo cual representa grandes desventajas durante el desarrollo de la perforación como: bajas tasas de penetración, alto uso y desgaste de los equipos. Por lo que el fluido base aceite mineral no resulta tener buen desempeño en ninguno de los cuatro sistemas de lodo más comunes y formulados en este estudio.

5.1.6 Otras investigaciones

- En 1993 la SPE publicó “Biodegradable Muds: An Attractive Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling” donde abre el camino para las investigaciones y deja en claro las ventajas muy seductoras del uso de materiales biodegradables en comparación con el uso del diesel normal que en esa fecha era usado [52].
- En 1997 en el 15 congreso mundial de petróleo se destacó la capacidad de los aceites vegetales como aditivos en lodos base agua y base pseudo-aceite en la publicación “Potential of New Drilling Formulations” donde se destaca las altas temperaturas de operación y el aumento de la rata de penetración debido a los cambios efectuados por estos aditivos [53].
- La SPE en el año de 2005 publicó: “Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds”, donde provee una caracterización y resalta los aceites vegetales como fase continua para lodos de perforación sin cambios sustanciales en la reología y con una seguridad para ser usado en las operaciones a alta temperatura [54].

- Especialistas de Pdvsa-Intevep desarrollaron, con resultados muy positivos, en el año de 2005 un aceite a base de soya para formular fluidos de perforación, a partir de derivados de aceite vegetal, reduciendo al mínimo el impacto ambiental. Los expertos en el área de Fluidos de Perforación del brazo tecnológico de PDVSA aseguran que el fluido no es tóxico y es biodegradable. Además, a diferencia de otros sistemas convencionales, los ripsos o recortes de perforación pueden ser descargados al mar, lo cual se traduce en un significativo ahorro por concepto de transporte y tratamiento de los mismos, pues no hace falta llevarlos a tierra para su posterior disposición. Cabe destacar que el empleo de la soya, como elemento predominante en la elaboración del fluido, podría dar paso al uso de otros insumos, tales como aceites de maíz o de ajonjolí e incluso, aceites de ceje o estropajo.

5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño estadístico de experimentos, desde su introducción por Ronald A. Fisher en la primera mitad del siglo XX en Inglaterra, se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. El trabajo de Fisher a través de su libro *The Design of Experiments* (1935), influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, ya que aportó métodos para evaluar los resultados de experimentos con muestras pequeñas. La clave de las aportaciones de Fisher radica en que este investigador se dio cuenta de que las fallas en la forma de realizar experimentos obstaculizaban el análisis de los resultados experimentales. Fisher también proporcionó métodos para diseñar experimentos destinados a investigar la influencia simultánea de varios factores [55].

El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de planear y hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser

analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder los interrogantes planteados, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. Algunos problemas típicos que pueden resolverse con el diseño y el análisis de experimentos son los siguientes:

1. Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
2. Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
3. Determinar los factores de un proceso que tienen impacto sobre una o más características del producto final.
4. Encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
5. Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
6. Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales.
7. Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
8. Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales.

El objetivo de los métodos estadísticos es lograr que el proceso de generar conocimiento y aprendizaje sea lo más eficiente posible. En este proceso, que ha demostrado ser secuencial, interactúan dos polos, por un lado están la teoría, los modelos, las hipótesis, las conjeturas y los supuestos; por el otro, están la realidad, los hechos, los fenómenos, la evidencia y los datos. Así, como se comenta en Box et al. (1978), una hipótesis inicial lleva a un proceso de deducción en el que las consecuencias derivadas de la hipótesis pueden ser comparadas con los datos. Cuando las consecuencias y los datos no corresponden, entonces la discrepancia puede llevar a un proceso de inducción, en el cual se modifica la hipótesis original. De esta manera inicia un segundo ciclo de la interacción de teoría y datos, en el

cual las consecuencias de la hipótesis modificada son comparadas con los datos (los viejos y los que se obtengan en este nuevo ciclo); esto puede llevar a futuras modificaciones y a la obtención de conocimiento [55].

5.2.1 Tipos de variables En un diseño de experimentos se presentan los siguientes tipos de variables, según el contenido conceptual, o papel que tienen en el mismo.

5.2.1.1 Variable independiente Es el factor que se supone influye sobre la característica que se mide. Para comprobar su influencia, el investigador la manipulara durante el experimento, en el sentido que le asignara valores diferentes a cada observación.

Esta variable también recibe el nombre de tratamiento y cada uno de los valores que se le asignaran, nivel de tratamiento.

5.2.1.2 Variable dependiente Es aquella variable que se mide en cada observación del experimento, para establecer si la variable independiente efectivamente influye sobre sus valores.

5.2.1.3 Variables extrañas Son aquellas que el investigador no puede manipular, pero influyen en la variable dependiente. Son la causa de que las observaciones en un mismo nivel de tratamiento no necesariamente arrojen el mismo valor de medida.

El conjunto de variables extrañas se denomina generalmente en el diseño de análisis de experimentos, ruido o error experimental.

5.2.1.4 Variable de bloqueo Es una variable que sabemos puede intervenir en los niveles de la variable dependiente y decidimos eliminar su influencia mediante el control de la misma, creando bloques de observaciones, en los que esta variable,

asume respectivamente un valor constante. A cada bloque se asignarán todos los niveles de tratamiento.

5.2.2 Variables analizadas en este estudio El modelo de diseño seleccionado fue el unidimensional, debido a que se analizó como única variable independiente la relación aceite/agua empleada en cada formulación, tomando como variables dependientes la comparación de las propiedades de cada formulación con biodiesel, respecto a su similar en base diésel; por lo tanto, solo es necesario repetitividad y comparación de los resultados para un correcto análisis [56].

- **Variable independiente.** La relación aceite/agua que se emplea en cada formulación influirá en las propiedades del fluido.
- **Variables dependientes.** Las propiedades del fluido, las cuales serán afectadas por la relación aceite/agua. Dentro de estas se tienen: densidad, propiedades reológicas, pérdida de filtrado, etc.
- **Variables de bloqueo.** Debido a que la efectividad de los aditivos es comercial y por tanto está comprobada, el efecto de estos en la preparación del fluido será considerado como constante. Se utilizará la concentración recomendada por el fabricante del producto.

Además, serán variables de bloqueo la temperatura y la presión, porque todas las pruebas se realizarán a las mismas medidas de estas variables.

En la tabla 11 se aprecian los parámetros medibles del diseño experimental.

Tabla 11. Parámetros medibles.

Relación biodiesel/agua	Independiente
Densidad	Dependiente
Propiedades reológicas	Dependiente
Filtrado API	Dependiente

5.3 PRUEBAS PRELIMINARES DEL BIODIESEL OBTENIDO

Las pruebas preliminares realizadas fueron:

- Determinación de la gravedad específica según norma API.
- Prueba de viscosidad Saybolt ASTM D 88
- Punto de relampagueo y fuego en copa abierta Cleveland según la norma ASTM D 92-90
- Prueba punto de fluidez ASTM D 97
- Prueba de compatibilidad del biodiesel obtenido con los aditivos comunes de los fluidos de emulsión inversa.

5.3.1 Caracterización del diesel y biodiesel La caracterización que se trata en este aparte, se refiere a ciertas condiciones que requieren cumplir los aceites que se utilizan en la preparación de lodos de perforación de emulsión inversa. Para la caracterización del diésel y biodiesel se determinaron algunas propiedades físicas y químicas que se muestran en la tabla 12 y que fueron realizados en el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del Diesel y Biodiesel.

PROPIEDAD	NORMA	DIESEL	BIODIESEL
Temperatura Ambiente		77 °F	77 °F
Gravedad °API	ASTM D 287/API	32,50 °API	28,9 °API
Densidad 60 °F		0,863 g/cc	0,882 g/cc
Punto de Relampagueo	ASTM D 92	219,8 °F	359,8 °F
Punto de Fuego	ASTM D 92	259,80 °F	399,80 °F
Punto de Fluidez	ASTM D 97	< 14 °F	37,4 °F

En la tabla 12 se observa que las propiedades que presentan mayor diferencia son el punto de relampagueo y de fuego; no obstante, cumplen con las especificaciones mínimas en estas propiedades [18]. Para el biodiesel se presenta un punto de relampagueo de 359,8 °F, el cual es mucho mayor con respecto al diésel (219,8 °F); esto es favorable ya que nos indica una reducción de incendios en el taladro al utilizar el biodiesel como fase continua. El punto de fluidez para el biodiesel es de 37,4 °F (3°C), este es un factor desfavorable ya que este fluido no se podría utilizar a bajas temperaturas, en zonas tales como en offshore o en zonas de gran altitud sobre el nivel del mar, en regiones que tienen las estaciones (en invierno) o cerca a los polos.

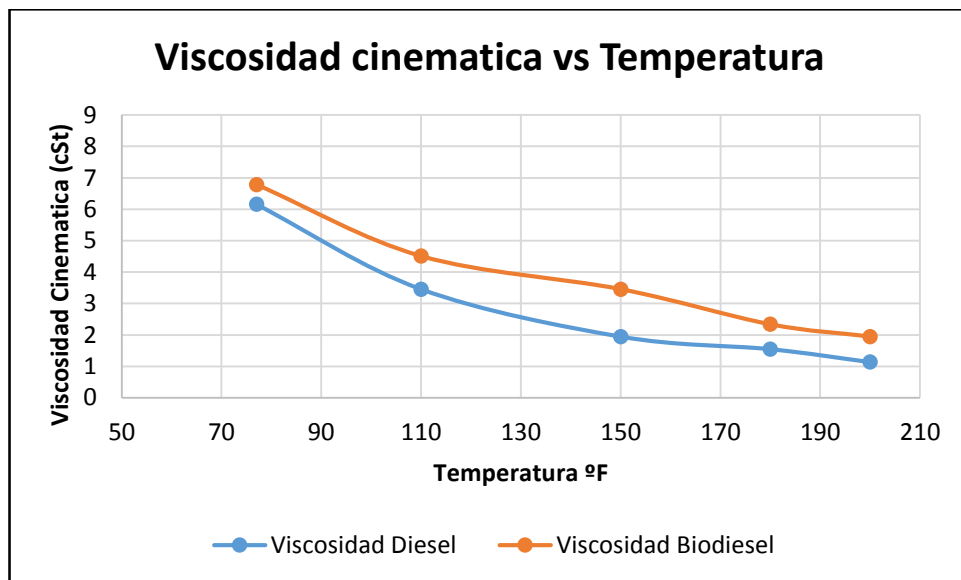
La densidad del biodiesel es similar al diésel, lo que se refleja en la baja diferencia en los valores de viscosidad cinemática de estos fluidos y que se observan en la tabla 13 y figura 9. El comportamiento de la viscosidad se evaluó con la temperatura utilizando el Viscosímetro Saybolt, que se basa en el principio de flujo por gravedad de un volumen determinado de líquido que pasa a través de un orificio calibrado.

En términos generales se puede decir que las propiedades del biodiesel obtenido a partir de aceite residual aviar, cumplen las exigencias de los aceites para ser utilizado como fase continua en los fluidos de perforación de emulsión inversa.

Tabla 13. Viscosidad cinemática del diésel y biodiesel a diferentes temperaturas.

Temperatura (°F)	Viscosidad cinemática diesel (cSt)	Viscosidad cinemática biodiesel (cSt)
77	6,16	6,79
110	3,46	4,51
150	1,95	3,46
180	1,55	2,34
200	1,14	1,95

Figura 9. Variación de la viscosidad del diésel y biodiesel a diferentes temperaturas.



En la figura 9 se puede apreciar la variación de la viscosidad del diesel y biodiesel con respecto a la temperatura, donde se concluye que a pesar de que el biodiesel presenta mayores viscosidades a las del diesel, no son muy significativas, por lo tanto, ofrecen una buena opción para ser utilizados en los fluidos base aceite.

5.3.2 Pruebas de compatibilidad La muestra es incompatible si se aprecia alguna reacción adversa entre las dos sustancias como formación y precipitación de sólidos de tamaño considerable, formaciones de gas, cambios en la viscosidad o fluidez.

Los aditivos para lodos de perforación de emulsión inversa se colocaron individualmente en contacto con el biodiesel obtenido para observar su grado de compatibilidad. Los aditivos utilizados fueron los siguientes:

- **Emulsificante.** Ácido graso poliaminado, se utiliza para emulsificar agua en aceite en los fluidos de perforación base aceite diesel. Mejora las características de humectación en aceite y fue diseñado para aplicarlo en fluidos base aceite con alto contenido de sales divalentes en la fase acuosa del fluido.
- **Viscosificante.** Es un aditivo viscosificador y gelificante de arcilla organofílica, aporta viscosidad y propiedades de suspensión a los fluidos de perforación base aceite. Esta arcilla bentonítica aumenta la capacidad de acarreo y de suspensión, al tiempo que refuerza los materiales densificantes y mejora la remoción de los recortes de perforación.
- **Controlador de filtrado.** Leonardita organofílica, se utiliza para controlar los índices de filtración en fluidos de perforación base aceite. Es estable a altas temperaturas y puede utilizarse para controlar la velocidad de filtración en pozos profundos con alta temperatura de fondo. También se puede utilizar para mejorar la emulsificación del agua en lodos base aceite y para promover la estabilidad del fluido.
- **Controlador de filtrado No 2.** Es usado para controlar la filtración en fluidos de perforación base aceite, en aplicaciones de alta presión y alta temperatura. Estable a temperaturas de 400 °F.
- **Modificador de reología.** Es usado para mejorar la reología y las características de suspensión en los fluidos de emulsión inversa. El modificador ayuda a aumentar las propiedades reológicas de baja velocidad de corte, lo que permite mejorar la capacidad de suspensión del lodo.

- **Cloruro de calcio.** Se utiliza para dar salinidad a la fase acuosa del lodo.
- **Alcalinizante.** Hidróxido de calcio Ca(OH)_2 utilizado como fuente de alcalinidad y saponificar el emulsificante principal.

5.3.2.1 Procedimiento prueba de compatibilidad

1. Se mezcló en un vaso la cantidad de aditivo con 100ml de biodiesel.
2. En un frasco de vidrio con tapa rotulada para cada aditivo se adiciono la mezcla (biodiesel + aditivo) de prueba.
3. Luego se dejó en reposo en un lugar adecuado a temperatura ambiente durante 40 días realizando observaciones periódicas (semanales).

Las cantidades de cada aditivo agregado al biodiesel para la prueba de compatibilidad se observan en la tabla 14.

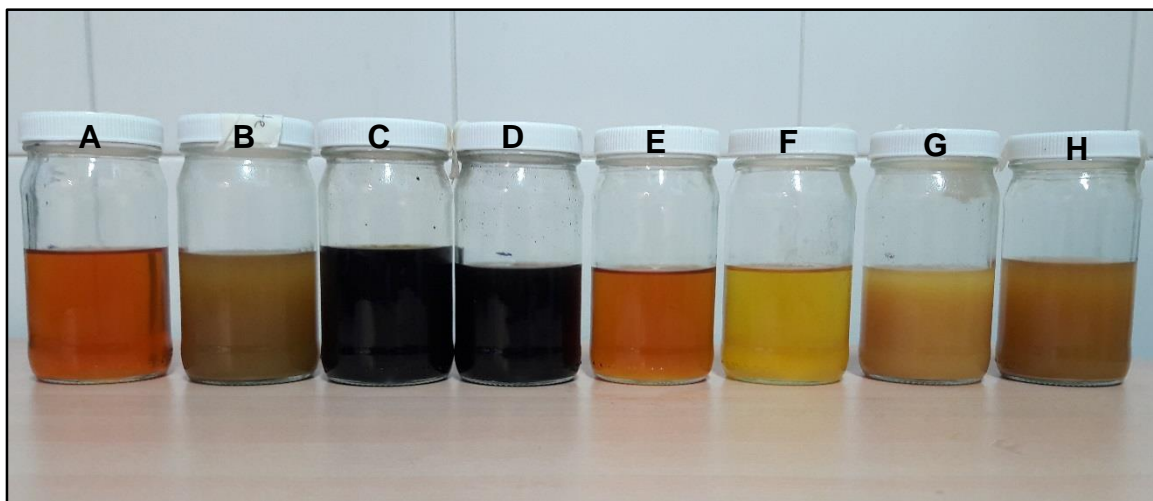
Tabla 14. Cantidad de aditivo y tiempo de agitación.

MUESTRA	TIEMPO DE AGITACIÓN [min]	CANTIDAD BODIESEL [ml]	CANTIDAD DE ADITIVO [g]
Biodiesel + Emulsificante	10	100	3
Biodiesel + Viscosificante	10	100	3
Biodiesel + Controlador de filtrado	10	100	3
Biodiesel + Controlador de filtrado 2	10	100	3
Biodiesel + Modificador de reología	10	100	3

MUESTRA	TIEMPO DE AGITACIÓN [min]	CANTIDAD BIODIESEL [ml]	CANTIDAD DE ADITIVO [g]
Biodiesel + Cloruro de calcio	10	100	3
Biodiesel + Alcalinizante	10	100	3
Biodiesel + Densificante	10	100	3

Después de 40 días se revisaron las muestras y se encontraron como se observa en la figura 10.

Figura 10. Resultados pruebas de compatibilidad.



A. Emulsificante; **B.** Viscosificante; **C.** Controlador de filtrado; **D.** Controlador de filtrado No. 2; **E.** Modificador de reología; **F.** Cloruro de calcio; **G.** Alcalinizante; **H.** Densificante.

En la tabla 15 se observan los resultados de la prueba de compatibilidad

Tabla 15. Resultados prueba de compatibilidad.

MUESTRA	BIODIESEL
Biodiesel + Emulsificante	Compatible
Biodiesel + Viscosificante	Compatible
Biodiesel + Controlador de filtrado	Compatible
Biodiesel + Controlador de filtrado No.2	Compatible
Biodiesel + Modificador de reología	Compatible
Biodiesel + CaCl ₂	Compatible
Biodiesel + Cal	Compatible
Biodiesel + Densificante	Compatible

5.4 PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS

5.4.1 Formulaciones con diesel y biodiesel Se prepararon todos con diesel y biodiesel, de acuerdo con la formulación planteada en este trabajo, donde se varió la relación aceite/agua (O/W), partiendo de 90/10, lo que significa que hay 90% de aceite y 10% de agua, esto se realizó con el fin de comparar las propiedades entre los fluidos. Estas formulaciones se hicieron con la cantidad de aditivo recomendada por el fabricante y su densidad fue ajustada a 12 lpg, lo cual se evidencia en la tabla 16.

Tabla 16. Formulación propuesta por el fabricante de los aditivos.

Relación O/W	90/10	80/20	70/30	60/40
Función	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)
<i>Fase continua</i>	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera
<i>Emulsificante</i>	6	6	6	6
<i>Viscosificante</i>	5	5	5	5
<i>Controlador de filtrado</i>	5	5	5	5
<i>Controlador de filtrado No.2</i>	10	10	10	10

Relación O/W	90/10	80/20	70/30	60/40
Función	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)	Concentración (lb/bbl)
<i>Modificador de reología</i>	1	1	1	1
<i>CaCl₂</i>	3,33	3,33	3,33	3,33
<i>Alcalinizante</i>	1	1	1	1
<i>Fase discontinua</i>	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera
<i>Densificante</i>	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera	Según se requiera

5.4.2 Pruebas de laboratorio

5.4.2.1 Densidad

Objetivo: medir las densidades de un fluido de perforación.

Unidad: lpg

5.4.2.2 Prueba de reología

Objetivo: determinar las lecturas del viscosímetro para calcular las siguientes propiedades de un fluido de perforación:

Propiedades	Unidades
Viscosidad plástica (VP)	cP
Viscosidad aparente (VA)	cP
Punto cedente (YP)	lb/100 ft ²
Resistencia de gel	lb/100 ft ²

5.4.2.3 Filtrado API

Objetivo: medir la cantidad de pérdida de filtrado y realizar el análisis de torta o cake.

Propiedad	Unidades
Cake	Inconsistente – Consistente Plástica – Quebradiza Espesor de la retorta (1/32 de pulgada)

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los fluidos base diesel y biodiesel de acuerdo con las formulaciones planteadas en el apartado 5.4.1; además se hace un análisis detallado para cada formulación.

En las tablas 17 y 18 se presentan los resultados de las pruebas realizadas para el diesel y biodiesel.

Tabla 17. Resultados de pruebas con diesel.

Variables	Unidades	90/10	80/20	70/30	60/40
Ø600	lb/100 ft ²	36	57	100	175
Ø300	lb/100 ft ²	18	34	70	145
Ø200	lb/100 ft ²	11	26	58	135
Ø100	lb/100 ft ²	7	17	43	105
Ø6	lb/100 ft ²	1	6	18	49
Ø3	lb/100 ft ²	1	5	15	41
Resistencia gel 10"	lb/100 ft ²	3	9	17	26
Resistencia gel 10'	lb/100 ft ²	5	11	20	35
VP	cP	18	23	30	30
VA	cP	18	28,5	50	87,5
YP	lb/100 ft ²	0	11	40	115
YS	lb/100 ft ²	1	4	12	31
Filtrado API	ml	6,5	5	4	2
Densidad	lpg	7	7,3	7,2	7,4
Cake	in	<1/32	<1/32	2/3	2/32
		Consistente	Inconsistente	Inconsistente	Consistente
		Plástica	Plástica	Plástica	Plástica

Tabla 18. Resultados de pruebas con biodiesel.

Variables	Unidades	90/10	80/20	70/30	60/40
Ø600	lb/100 ft ²	34	53	104	282
Ø300	lb/100 ft ²	19	31	73	245
Ø200	lb/100 ft ²	13	27	57	213
Ø100	lb/100 ft ²	8	19	40	175
Ø6	lb/100 ft ²	1	4	16	75
Ø3	lb/100 ft ²	1	3	15	68
Resistencia gel 10"	lb/100 ft ²	4	8	16	23
Resistencia gel 10'	lb/100 ft ²	7	10	24	44
VP	cP	15	22	31	37
VA	cP	17	26,5	52	141
YP	lb/100 ft ²	4	9	42	208
YS	lb/100 ft ²	1	2	14	64
Filtrado API	ml	14	8	6,5	4
Densidad	lpg	7,2	6,7	7,5	7,6
Cake	in	<1/32	<1/32	2/32	2/32
		Consistente	Inconsistente	Inconsistente	Inconsistente
		Plástica	Plástica	Quebradiza	Plástica

6.1 ANÁLISIS FORMULACIÓN 90/10.

En las tablas 19, 20 y 21 se muestran los resultados de la relación aceite/agua, para la formulación 90/10 y en las figuras 11 y 12 se representa gráficamente el comportamiento reológico.

Tabla 19. Propiedades de la Formulación 90/10.

Formulación	Unidades	Diesel	Biodiesel
Ø600	lb/100 ft ²	36	34
Ø300	lb/100 ft ²	18	19
Ø200	lb/100 ft ²	11	13

Formulación	Unidades	Diesel	Biodiesel
Θ100	lb/100 ft ²	7	8
Θ6	lb/100 ft ²	1	1
Θ3	lb/100 ft ²	1	1
Resistencia Gel 10''		3	4
Resistencia Gel 10'		5	7
VP	cP	18	15
VA	cP	18	17
YP	lb/100 ft ²	0	4
YS	lb/100 ft ²	1	1
Filtrado API	ml	6,5	14
Peso lodo	lpg	7	7,2
Cake	in	<1/32	<1/32
		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica

Tabla 20. Reología de la formulación 90/10.

Diesel				Biodiesel			
RPM	v [1/s]	ΘRPM [lb/100ft ²]	μEfec [cP]	RPM	v [1/s]	ΘRPM [lb/100ft ²]	μEfec [cP]
600	1020	36	18	600	1020	34	17
300	510	18	18	300	510	19	19
200	340	11	16,5	200	340	13	19,5
100	170	7	21	100	170	8	24
6	10,2	1	50	6	10,2	1	50
3	5,1	1	100	3	5,1	1	100

Figura 11. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte formulación 90/10.

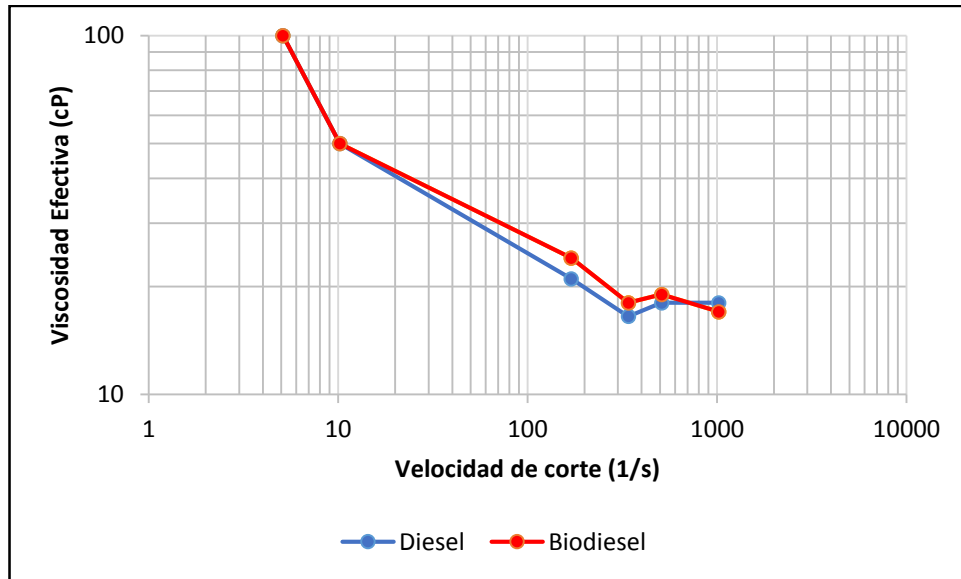


Figura 12. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 90/10.

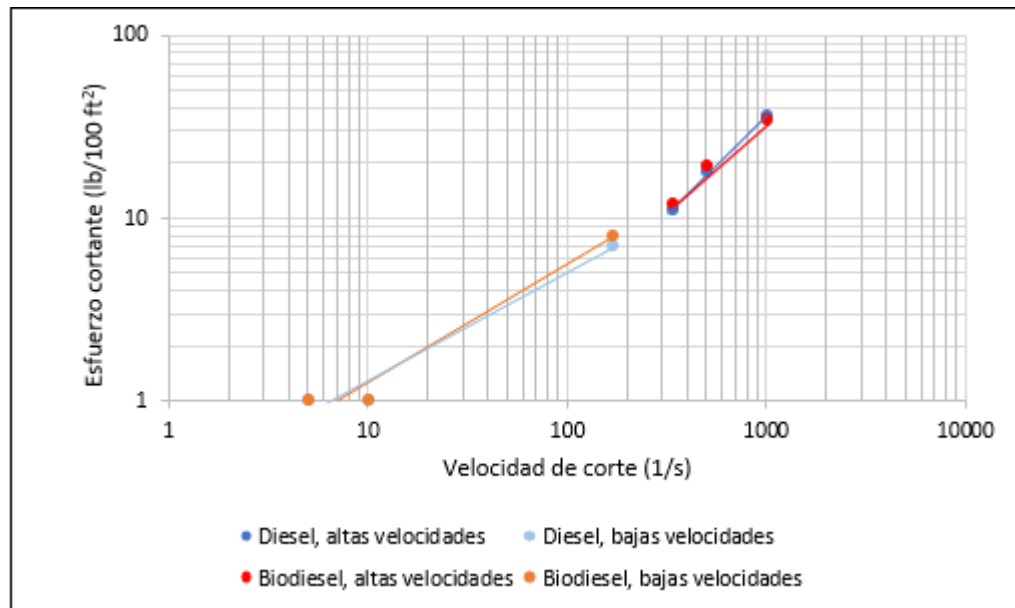


Tabla 21. Resultados de índice de la ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 90/10.

Fluido	na	nb	Ka [lb/100ft²]	Kb [lb/100ft²]
Diesel	0,98	0,55	0,038	0,43
Biodiesel	0,83	0,59	0.108	0,40

Se observó que el filtrado API del lodo base diesel se encuentra dentro del rango máximo permisible en pruebas de laboratorio (<7 ml) establecido, por el contrario el fluido base biodiesel sobrepaso este rango, lo que es desfavorable debido a que un excesivo filtrado genera una capa de lodo más gruesa, incrementando la posibilidad de una pega de tubería y reduciendo el diámetro efectivo del pozo

Los lodos base diesel y biodiesel, presentaron un aumento del 40% aproximadamente, en las pruebas de resistencia de gel tomadas a 10" y 10' respectivamente, lo que quiere decir que se encuentra dentro del rango de geles buenos, además no presenta una gelificación rápida del lodo, tienen buena suspensión y es una ventaja al momento de pausar y reanudar la operación.

Se observa que los valores de viscosidad plástica no tiene gran diferencia si se comparan los resultados de cada fluido empleado, pero esta propiedad es un poco menor para el biodiesel, lo que indica que tendrá mejor comportamiento, porque una baja viscosidad plástica favorece al aumento de energía en la broca, mejora el flujo en el anular para limpieza de pozo y reduce el desgaste de los equipos.

Se encontró un punto cedente de 0 y 4 (lb/100ft²), para el diesel y biodiesel respectivamente, de lo cual se puede deducir que para esta formulación tiene un mejor comportamiento el fluido base biodiesel, debido a que bajos valores de punto cedente, indican bajo poder de acarreo de rípios.

Los resultados de comparación entre los cake muestran que para los fluidos son plásticas, consistentes y con espesor menor a 1/32 de pulgada.

Para los lodos base diesel y biodiesel, se evidencia en la figura 12, que el esfuerzo de corte aumenta con la velocidad de corte, lo que indica que estos fluidos tienen un comportamiento pseudoplástico, que además se ve reflejado en la figura 11, donde la viscosidad efectiva disminuye con la velocidad de corte.

La figura 11 muestra la variación de la viscosidad efectiva para los fluidos base con respecto a la velocidad de corte, donde se observó una tendencia similar en las velocidades de corte estudiadas, en el rango de velocidad medias, el fluido base biodiesel obtuvo valores un poco más elevados factor favorable para la suspensión y transporte de recortes.

La tabla 21 muestra los respectivos valores de índices n y K , para cada base utilizada a bajas y altas velocidades.

Se observó que para altas velocidades el lodo base diésel tiene un factor n muy alto y cercano a 1, y un factor K muy bajo, el fluido base biodiesel presenta una disminución leve de estos factores, por lo tanto debido a su comportamiento similar estos fluidos presentan deficiencias en la suspensión de ripios y limpieza del pozo.

Para bajas velocidades los fluidos presentan comportamiento semejante con respecto al índice n y presentan un factor K bajo, lo que indica que la limpieza de pozo es deficiente, con una leve diferencia favorable del diesel.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS FORMULACIÓN 80/20.

En las tablas 22, 23 y 24 se muestran los resultados de la relación aceite/agua, para la formulación 80/20 y en las figuras 13 y 14 se representa gráficamente el comportamiento reológico.

Tabla 22. Propiedades de la formulación 80/20.

Formulación	Unidades	Diesel	Biodiesel
Θ600	lb/100 ft ²	57	53
Θ300	lb/100 ft ²	34	31
Θ200	lb/100 ft ²	26	25
Θ100	lb/100 ft ²	17	16
Θ6	lb/100 ft ²	6	4
Θ3	lb/100 ft ²	5	3
Resistencia Gel 10''		9	8
Resistencia Gel 10'		11	10
VP	cP	23	22
VA	cP	28,5	26,5
YP	lb/100 ft ²	11	9
YS	lb/100 ft ²	4	2
Filtrado API	ml	5	7
Peso lodo	lpg	7	7,2
Cake	in	<1/32	<1/32
		Consistente	Inconsistente
		Plástica	Plástica

Tabla 23. Reología de la formulación 80/20.

Diesel				Biodiesel			
RPM	ν [1/s]	Θ RPM [lb/100 ft ²]	μ Efec [cP]	RPM	ν [1/s]	Θ RPM [lb/100 ft ²]	μ Efec [cP]
600	1020	57	28,5	600	1020	53	26,5
300	510	34	34	300	510	31	31
200	340	26	39	200	340	25	40,5
100	170	17	51	100	170	16	57
6	10,2	6	300	6	10,2	4	200
3	5,1	5	500	3	5,1	3	300

Figura 13. Viscosidad Efectiva vs Velocidad de corte, formulación 80/20.

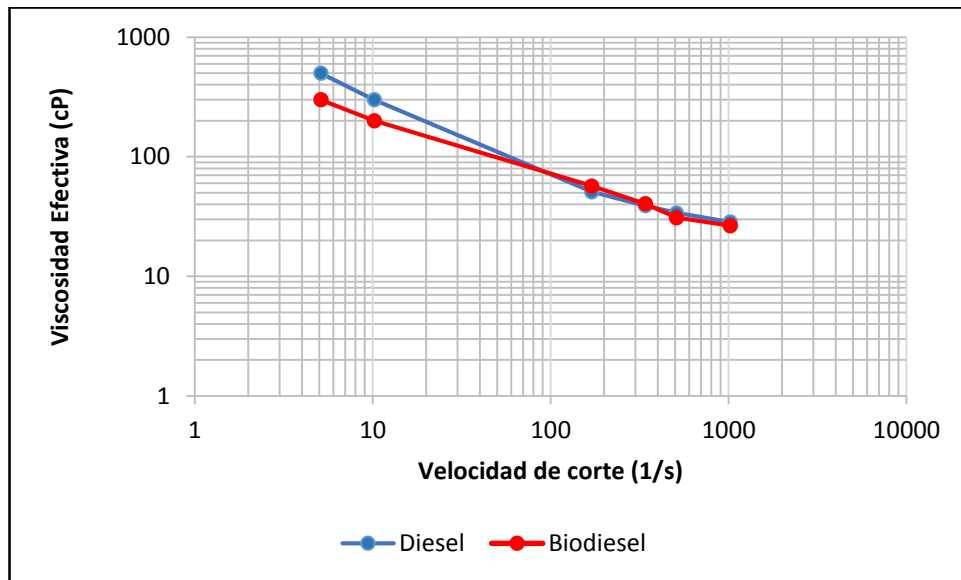


Figura 14. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 80/20.

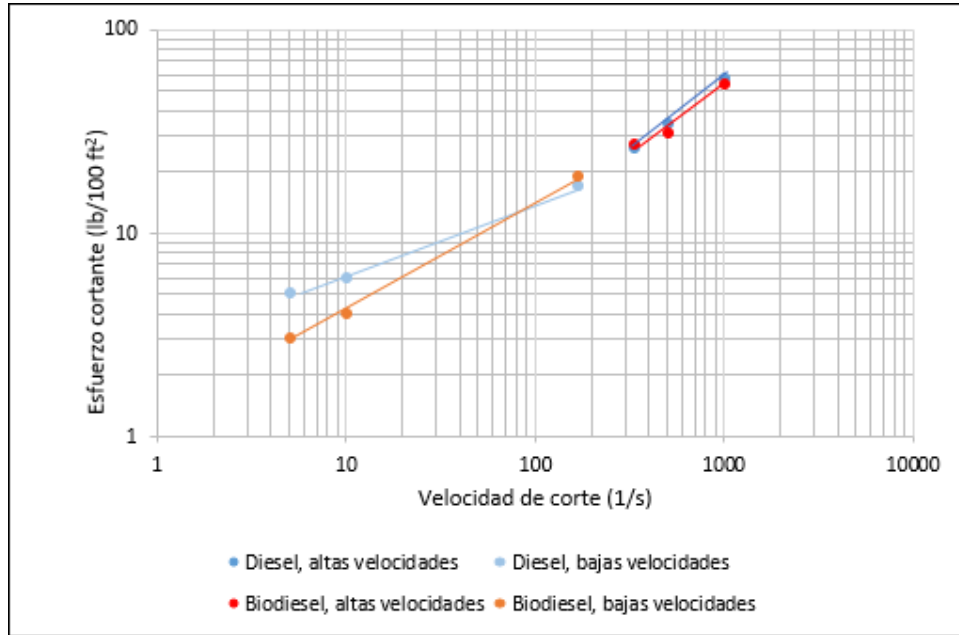


Tabla 24. Resultado de índice de ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 80/20.

Fluido	na	nb	Ka [lb/100ft ²]	Kb [lb/100ft ²]
Diesel	0,74	0,35	0,35	3,02
Biodiesel	0,77	0,52	0,27	1,36

El filtrado API para los fluidos se encuentran dentro del límite establecido, lo que demuestra que el lodo base biodiesel tiene mejor comportamiento comparado con la anterior relación (O/W), además, se observó que la emulsión se mantuvo firme durante todo el análisis, debido a que el filtrado fue 100% aceite en las bases utilizadas.

Los lodos base diesel y biodiesel, no presentaron una diferencia significativa en las pruebas de resistencia de gel tomadas a 10" y 10', lo que indica que no se presentando geles progresivos, lo que es favorable para la suspensión de sólidos y facilita la reanudación de la operación.

Se observa que las viscosidades plásticas de los fluidos son muy similares, el porcentaje de variación es menor al 5%, lo que demuestra un buen comportamiento del fluido base biodiesel.

Se encontró un punto cedente de 11 y 9 (lb/100ft²), para el diesel y biodiesel respectivamente, lo que indica que para esta formulación tiene un mejor comportamiento el fluido base diesel, debido a un mejor comportamiento en la suspensión de ripios.

Los resultados de cake se mostraron plásticos y de espesor <1/32 de pulgada para las bases utilizadas, pero difieren en la consistencia siendo la del biodiesel inconsistente.

Para los lodos base diesel y biodiesel, se evidencia en la figura 14, que el esfuerzo de corte aumenta con la velocidad de corte, lo que muestra que estos fluidos tienen un comportamiento pseudoplástico; además se ve reflejado en la figura 13, donde la viscosidad efectiva disminuye con la velocidad de corte.

La figura 13 muestra la variación de la viscosidad efectiva para cada uno de los tipos de base con respecto a la velocidad de corte, se observó en el rango de velocidades bajas existe un ligero desfase de las curvas, lo que indica que inicialmente el diésel tiene un mejor comportamiento y a medida que la velocidad aumenta, esta diferencia se reduce y se comportan similarmente.

La tabla 24 muestra los respectivos valores de índices n y K, para cada base utilizada a bajas y altas velocidades.

Se observó que para altas velocidades los factores n y K para diesel y biodiesel no presenta gran diferencia entre sí, lo que indica un comportamiento similar de los fluidos en la suspensión de ripios y limpieza del pozo.

Para bajas velocidades el fluido base diesel presenta un mejor comportamiento basados en los índices de la ley de potencias, comparado con el fluido base biodiesel, por lo tanto, la capacidad de limpieza de pozo es superior, factor favorable para la perforación.

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS FORMULACIÓN 70/30.

En las tablas 25, 26 y 27 se muestran los resultados de la relación aceite/agua, para la formulación 70/30 y en las figuras 15 y 16 se representa gráficamente el comportamiento reológico.

Tabla 25. Propiedades de la formulación 70/30.

Formulación	Unidades	Diesel	Biodiesel
Θ600	lb/100 ft ²	100	104
Θ300	lb/100 ft ²	70	73
Θ200	lb/100 ft ²	58	57
Θ100	lb/100 ft ²	43	40
Θ6	lb/100 ft ²	18	16
Θ3	lb/100 ft ²	15	15
Resistencia Gel 10''		17	18
Resistencia gel 10'		20	21
VP	cP	30	31
VA	cP	50	52
YP	lb/100 ft ²	40	42
YS	lb/100 ft ²	12	14
Filtrado API	ml	4	6,5
Peso lodo	lpg	7,2	7,5
Cake	in	2/32	2/32
		Inconsistente	Inconsistente
		Plástica	Quebradiza

Tabla 26. Reología de la formulación 70/30.

Diesel				Biodiesel			
RPM	$\dot{\gamma}$ [1/s]	Θ RPM [lb/100 ft ²]	μ_{Efec} [cP]	RPM	$\dot{\gamma}$ [1/s]	Θ RPM [lb/100ft ²]	μ_{Efec} [cP]
600	1020	100	50	600	1020	104	52
300	510	70	70	300	510	73	73
200	340	58	87	200	340	57	85,5
100	170	43	129	100	170	40	120
6	10,2	18	900	6	10,2	16	800
3	5,1	15	1500	3	5,1	15	1500

Figura 15. Viscosidad Efectiva vs Velocidad de corte, formulación 70/30.

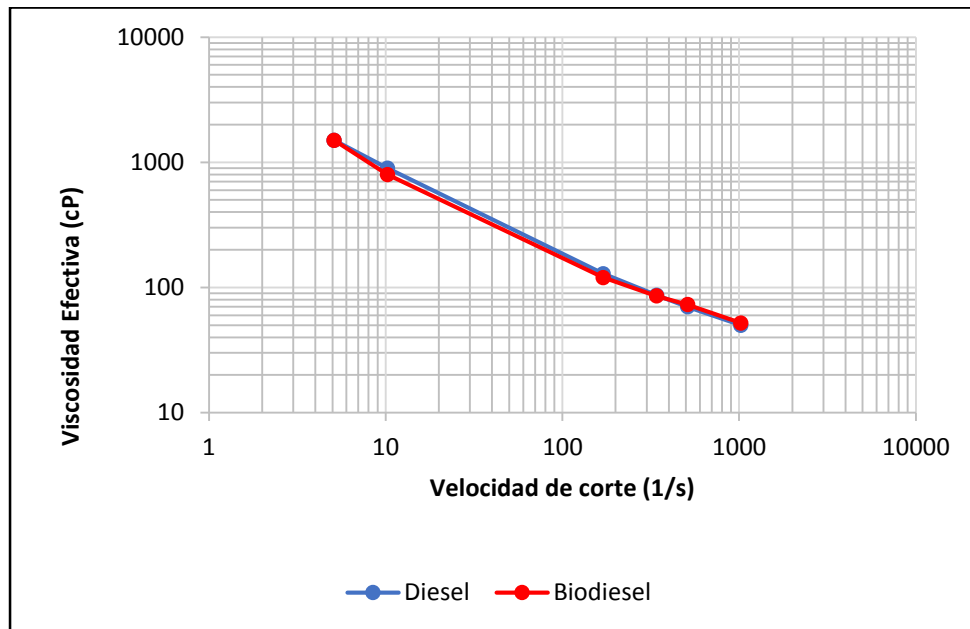


Figura 16. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 70/30.

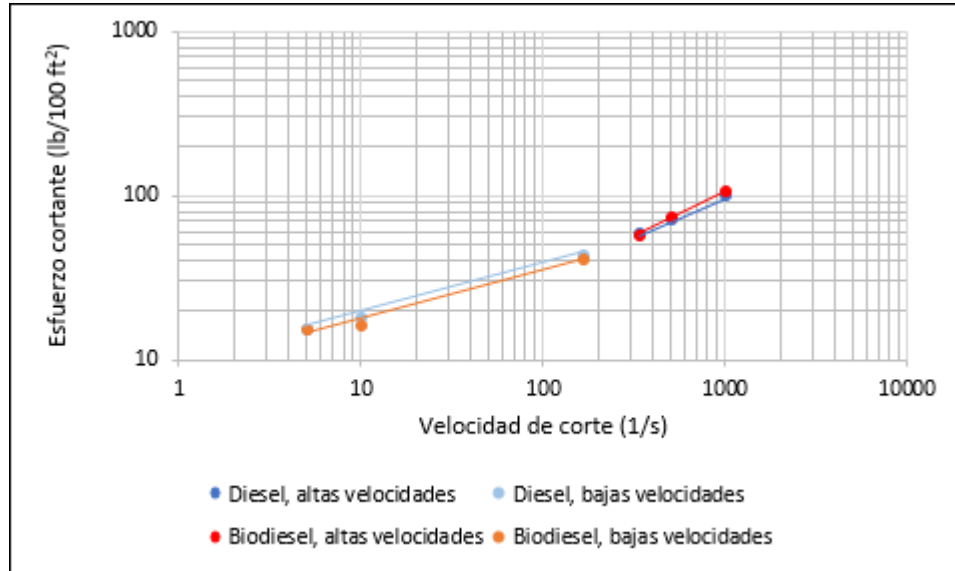


Tabla 27. Resultados de índice de la ley de potencia e índice de consistencia para la formulación 70/30.

Fluido	na	nb	Ka [lb/100ft ²]	Kb [lb/100ft ²]
Diésel	0,51	0,3	3,03	9,84
Biodiesel	0,51	0,28	3,23	10,1

Se observó que los filtrados API para cada tipo de base utilizada se encuentran dentro del rango establecido, además, se observó que el filtrado fue solo aceite, lo que indica que se formó una emulsión firme y estable.

La resistencia de gel para los fluidos no presenta cambios significativos en los tiempos medidos, lo que indica que no se presentan geles progresivos, factor favorable al momento de suspender y reanudar la perforación, además el fluido base biodiesel sigue presentando valores cercanos al base diesel, lo que indica buen comportamiento.

Se observa que la viscosidad plástica no tiene gran variación comparando los resultados de cada fluido, lo que indica que el biodiesel sigue demostrando buen comportamiento, además esta propiedad ha aumentado de manera progresiva debido al incremento de agua en las formulaciones.

Se encontró un punto cedente de 40 y 42 (lb/100ft²), para el diésel y biodiesel respectivamente, el biodiesel al presentar un valor un poco más elevado, indica que presenta mejor comportamiento en el acarreo de ripios.

Los resultados de comparación entre los cake mostraron para ambas formulaciones un espesor de 2/32 de pulgada, inconsistentes y difieren en que la del biodiesel es quebradiza.

Para los lodos base diesel y biodiesel, se evidencia en la figura 16, que el esfuerzo de corte aumenta con la velocidad de corte, lo que indica que estos fluidos tienen un comportamiento pseudoplástico, que además se ve reflejado en la figura 15, donde la viscosidad efectiva disminuye con la velocidad de corte.

La figura 15 muestra la variación de la viscosidad efectiva para los tipos de base con respecto a la velocidad de corte, donde el lodo base biodiesel mostro un excelente comportamiento, comparado con las formulaciones anteriores, donde se ajustó completamente a la curva formada por el diesel.

La tabla 27, muestra los respectivos valores de índice n y K , para cada base utilizada a bajas y altas velocidades.

Se observó que para altas y bajas velocidades los fluidos presentan similar comportamiento en limpieza de pozo y suspensión de sólidos, debido a que sus índices de la ley de potencias presentan valores muy cercanos.

6.4 ANÁLISIS FORMULACION 60/40.

En las tablas 28, 29 y 30 se muestran los resultados de la relación aceite/agua, para la formulación 60/40 y en las figuras 17 y 18 se representa gráficamente el comportamiento reológico.

Tabla 28. Propiedades de la formulación 60/40.

Formulación	Unidades	Diesel	Biodiesel
Ø600	lb/100 ft ²	170	282
Ø300	lb/100 ft ²	140	245
Ø200	lb/100 ft ²	120	213
Ø100	lb/100 ft ²	100	155
Ø6	lb/100 ft ²	39	72
Ø3	lb/100 ft ²	35	68
Resistencia Gel 10''		26	23
Resistencia Gel 10''		35	44
VP	cP	30	37
VA	cP	85	141
YP	lb/100 ft ²	110	208
YS	lb/100 ft ²	31	64
Filtrado API	ml	2	4
Peso Lodo	lpg	7,4	7,6
Cake	in	2/32	2/32
		Inconsistente	Inconsistente
		Plástica	Plástica

Tabla 29. Reología de la formulación 60/40.

Diesel				Biodiesel			
RPM	ν [1/s]	Θ RPM [lb/100 ft ²]	μ Efec [cP]	RPM	ν [1/s]	Θ RPM [lb/100 ft ²]	μ Efec [cP]
600	1020	170	85	600	1020	282	141
300	510	140	140	300	510	245	245
200	340	120	180	200	340	213	319,5
100	170	100	300	100	170	155	465
6	10,2	39	1950	6	10,2	72	3600
3	5,1	35	3500	3	5,1	68	6800

Figura 17. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte, formulación 60/40

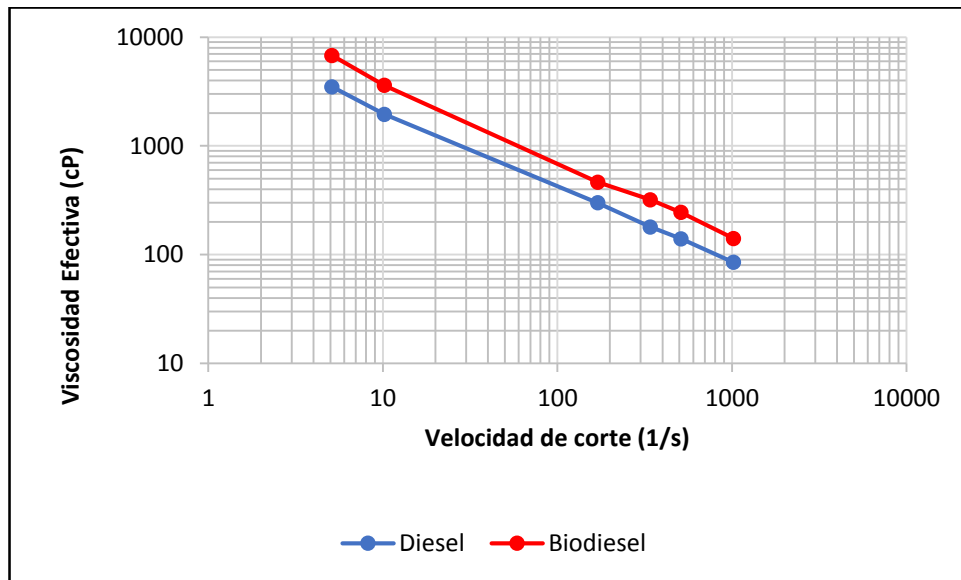


Figura 18. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, formulación 60/40.

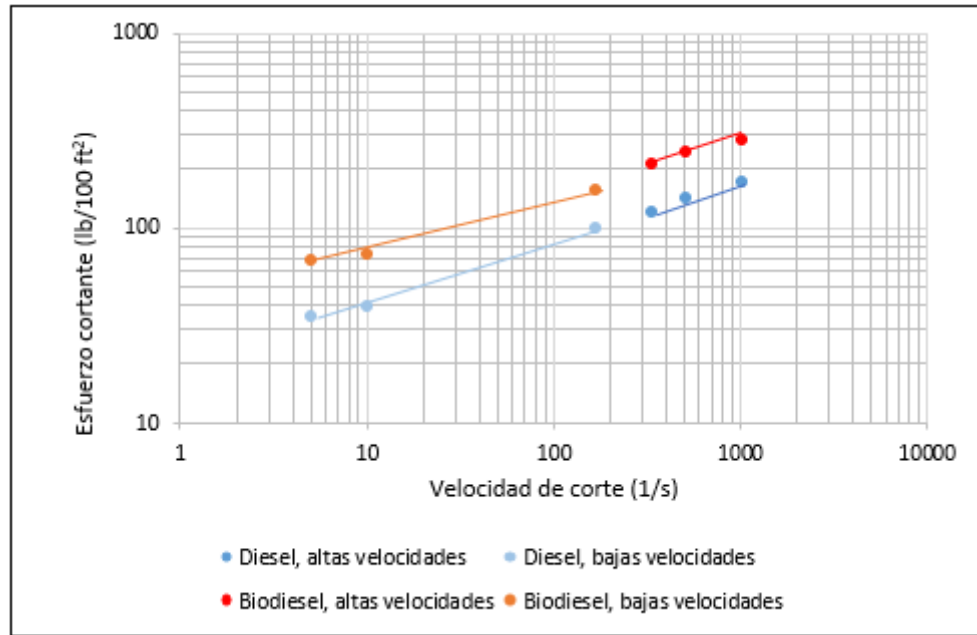


Tabla 30. Resultados de índice de la ley de potencias e índice de consistencia para la formulación 60/40.

Fluido	na	nb	Ka [lb/100ft ²]	Kb [lb/100ft ²]
Diesel	0,28	0,3	26,12	23
Biodiesel	0,20	0,23	73,98	49,61

En los resultados de esta formulación se observa que los filtrados API para cada tipo de base utilizada se encuentran dentro del rango establecido, y el filtrado se redujo al aumentar la cantidad de fase dispersa en cada formulación, además, se observó que el filtrado fue 100% aceite, lo que muestra que se formó una emulsión firme y estable lo suficiente para no romperse durante los análisis.

Para esta formulación el fluido base biodiesel, presento resistencias de gel a 10" y 10' de 23 y 44 respectivamente, lo que indica aparición de geles progresivos, que es un problema en la reanudación de la perforación, debido a que se necesitara de potencia extra para continuar la operación, además valores muy altos de esfuerzo

de gel, puede causar efectos desfavorables, como por ejemplo, fractura de la formación.

Se observa que la viscosidad plástica del lodo base biodiesel, presenta un incremento desfavorable si se compara con el base diesel, debido a que un aumento de viscosidad plástica genera mayor potencia para mover el fluido, menores tasas de perforación, mayor desgaste de los equipos.

Se encontró un punto y esfuerzo cedente del fluido base biodiesel de aproximadamente dos veces mayor comparado con el valor reportado por el diesel, lo que indica un gran aumento de viscosidad, donde se pueden generar problemas para mover el fluido, además el biodiesel se desvió completamente de la tendencia similar que venía mostrado en las formulaciones anteriores.

Los resultados de comparación entre los cake cumplen para ambos fluidos en que son consistentes y plásticas, pero están fuera del espesor recomendado, debido a que para estos fue de $2/32'$ de pulgada.

Para los lodos base diésel y biodiesel, se evidencia en la figura 18, que el esfuerzo de corte aumenta con la velocidad de corte, lo que ratifica que estos fluidos tienen un comportamiento pseudoplástico, que además se ve reflejado en la figura 17, donde la viscosidad efectiva disminuye con la velocidad de corte.

La figura 17 muestra la variación de la viscosidad efectiva para ambos tipos de base con respecto a la velocidad de corte, donde el fluido base biodiesel se encuentra por encima de la curva del diésel, esto debido al aumento de la fase dispersa en el lodo, además mostro un porcentaje de variación aproximado del 40%.

La tabla 30 muestra los respectivos valores de índice n y K , para cada base utilizada a bajas y altas velocidades.

Se observó para altas y bajas velocidades según los índices de la ley de potencias, que el fluido base biodiesel presenta mejores propiedades para la limpieza de pozo y suspensión de ripios, pero debido al análisis de las demás variables, se concluye que debido a la gran viscosidad mostrada y a su desviación con los datos del diesel, este fluido no es recomendable bajo esta formulación.

7. CONCLUSIONES

- El tratamiento de esterificación con ácido sulfúrico resultó ser eficiente para reducir el índice de acidez de 4,03 a 0,69 [mg KOH/aceite], esto se reflejó en una mejora del aceite residual aviar como materia prima; a partir de esto se logró obtener biodiesel con un rendimiento de 90,5% con respecto al aceite aviar y FAME de 98,56%
- El biodiesel obtenido cumple con los requisitos para ser empleado como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa y fue compatible con los aditivos utilizados en la preparación de las formulaciones.
- El filtrado API para los fluidos base empleados en todas las formulaciones estuvo dentro del rango recomendado, exceptuando la formulación base biodiesel (90/10).
- Las figuras de esfuerzo de corte vs Velocidad de corte y Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte, mostraron en todas las formulaciones el comportamiento de fluidos pseudoplásticos.
- La resistencia de gel en todas las formulaciones resultó ser mayor en los fluidos base biodiesel, lo que indica que estos tienen una mayor capacidad de suspensión de sólidos comparados con los base diesel, exceptuando la formulación 60/40 donde el lodo base diesel presentó geles progresivos.
- Interpretando los índices de la ley de potencias se observa que los fluidos base biodiesel, presentaron valores similares a los del diesel, en las velocidades evaluadas, lo que indica que este aceite presenta buenas propiedades de

limpieza de pozo y suspensión de ripios, exceptuando la formulación 60/40, donde la alta viscosidad lo hace un fluido poco aplicable en la perforación.

- La mejor formulación de emulsión inversa con biodiesel fue la de relación (70/30), debido a que tuvo un comportamiento similar al diesel en todas las propiedades y donde se observó una mayor capacidad para suspender ripios y mantener la limpieza del pozo, basando en los parámetros de la ley de potencias.
- La formulación 60/40 base biodiesel fue la que presento mayor diferencia comparado con su similar base diesel, se evidencio un aumento en sus propiedades reologicas, características desfavorables para la perforacion, debido a su gran aumento de viscosidad, presencia de geles progresivos, alto punto cedente, factores que dificultan el bombeo del fluido y la reanudación de la operación.
- Los cake de los lodos base biodiesel es la propiedad que más muestra irregularidades comparadas con las del diésel, estas mostraron en las pruebas ser inconsistentes, de gran espesor y quebradizas, lo que generaría problemas en el control de filtrado hacia la formación y pega de tuberías.

8. RECOMENDACIONES

- Experimentar, comparar y analizar los resultados con otros catalizadores como metilato de sodio y metilato de potasio en la reacción de transesterificación del aceite residual aviar.
- Realizar pruebas de filtrado y reología a alta presión y temperatura, estabilidad eléctrica, pruebas de pH para lodos base aceite, para realizar un estudio más amplio de aplicación con este tipo de biodiesel.
- Realizar un estudio económico sobre la factibilidad de utilizar aceite residual aviar transesterificado como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.
- Realizar un estudio económico sobre la factibilidad de utilizar aceite residual aviar transesterificado como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa, donde se contemple su aplicación en la industria petrolera y se tengan en cuenta los posibles factores que influyan a nivel de capital de inversión.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTILLO, Álvaro. Evaluación y optimización de diferentes fluidos de perforación aplicados para el campo villano, operado por Agip Oil Ecuador, tesis de grado para obtener el título de ingeniero de petróleo, Guayaquil ecuador, 2008.
- [2] LUZARDO, J; QUIROGA, F. y MARTÍNEZ, A. Evaluación de aceites minerales en lodos de emulsión inversa. Primer Seminario de Fluidos de Perforación y Completamiento de Pozos. Caracas – Venezuela, 1990.
- [3] CORREIA, Joseph, *et al.* Formulación de un fluido de perforación base diesel de bajo impacto ambiental. Boletín de Geología, 37 (2) 2015. p.75-82
- [4] MUÑOZ HERNANDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CARDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2012.
- [5] BERNA Tatiana y ILIA Ibis. Estudio de factibilidad del uso de glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2008.
- [6] CARDONA, Carlos. Evaluación ambiental de residuos en la granja avícola CAFARI del municipio de San Pedro- Valle del Cauca, trabajo de grado para optar por el título de ingeniero ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente Programa de Ingeniería Ambiental Palmira 2015. p. 20-27.

- [7] AVELLANEDA., Fredy. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Universitat Rovira I Virgili, 2010.
- [8] DIAZ, Karen; y RAMIREZ, Karen. Acondicionamiento del aceite residual avícola y evaluación de uso potencial en la obtención de biodiesel. Trabajo de grado (ingeniero químico), Universidad Industrial De Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Bucaramanga 2016.
- [9] VIVAS, Andrea. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino, Univesidad Tecnológica de Pereira, programa de Quimica Industrial, Pereira, Colombia, 2010.
- [10] Asme shale shaker committee. Drilling fluids processing Handbook. Reino unido: Gulf professional publishing, 2004, ISBN 0-7506-7775-9.
- [11] M-I & SWACO. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0 Houston, Texas 2001.
- [12] GUARACHI Fredy. Guía de fluidos de perforación y laboratorio, Instituto Americano del Petróleo. Dallas, Texas 2005.
- [13] Ingeniería en fluidos de perforación, Manual QMAX de fluidos de perforación. México.
- [14] GARCIA ALVAREZ, David. Estudio del efecto de la adición del compuesto z-trol 60 como emulsificante y humectante en fluidos en fluidos de perforación base aceite. UCV. Venezuela 2002.

- [15] Manual de fluidos de perforación energy API, procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Dallas, Texas.
- [16] PRIETO, Ali. Tecnología básica de los fluidos de perforación, manual técnico. Asesoría petrolera orientada, 2007.
- [17] HAWKER, David y VOGT, Karen. Manual de perforación datalog, procedimientos y operación en el pozo, marzo 2001.
- [18] GONZALEZ, José Y MATTA, Gabriel. Factibilidad del uso de aceite mineral blanco grado técnico como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa, Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos), Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Bucaramanga, 2014.
- [19] CAENN, Ryen, *et al.* Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Ed. Gulf Professional Publishing, seventh Edition, E.U.A. 2016.
- [20] PARSONS, C.P. Characteristics of Drilling Fluids, Society of Petroleum engineers. Tulsa, 1930. P.227–233.
- [21] Drilling, completion and workover fluids. World Oil, publishing, 2008.
- [22] BENAVIDES, Fabio. y QUINTERO Jimmy. Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa, Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos), Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Bucaramanga, 2010.
- [23] MELLÍN, Jose. Estudio experimental para la evaluación de hundimiento de barita y acreción en sistemas base no acuosas empleados en la perforación de aguas profundas, Trabajo de grado (Ingeniero petrolero), Universidad

Nacional Autónoma De México, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería En Ciencias De La Tierra, México D.F., 2012.

- [24] AL-MEJED, Abdulaziz Abdullan & HOSSAIN, Enamul. A Fundamentals of sustainable drilling engineering. Canadá: scrivener publishing Wiley, 2015. ISBN 978-0-470-87817-0.

- [25] RODRIGUEZ, Eliserio. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga 2007.

- [26] REIS, John. Enviromental control in petroleum engineering. First edition, Publishing, 1996. p.29-31.

- [27] THOMAS, D.; HSING, H. & MENZIE, D. Evaluation of Core Damage Caused by Oil-Based Drilling and Coring Fluids. Society of Petroleum Engineers. Houston Texas,1984.

- [28] JURJ, Adriana. Study of biodiesel fuel production through enzymatic methods, Babes-bolyai University, Faculty of chemisty and Chemical Engineering, Rumania, 2011.

- [29] ARÉVALO, Pablo; ULLOA, Jose. y ASTUDILLO, Servio. Obtención de biodiesel a partir de grasa bovina. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2008.

- [30] DEMIRBAS, Ayhan. Biodiesel production from vegetable oils by supercritical methanol. Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 64, November 2005, p. 858-865

- [31] CASTRO, Paula; COELLO, Javier y CASTILLO Liliana. Opciones para la producción uso de biodiesel en el Perú. 1ª Edición. Lima (Perú): Ediciones Soluciones prácticas, 2007. p.173.
- [32] MOLINERO, Laura. Producción de monoglicéridos por esterificación de glicerina con ácidos cinámico y p-metoxicinámico, Madrid, 2012.
- [33] MOSER, Bryan. Biodiesel production, properties, and feedstock. In Vitro Cellular & Developmental Biology 2009, Vol. 45, No. 3, p.229-266
- [34] CERVERO, José; COCA José y LUQUE Susana.; Production of biodiesel from vegetable Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Oviedo, 2008. p.76-83.
- [35] DURBIN, Thomas; JIANG, Michelle & MILLER, Wayne. Biodiesel fleet durability study, University of California, July 2010.
- [36] DEMIRBAS Ayhan. Biodiesel, A realistic fuel alternative for diesel engines. Trabzon, turkia, mayo, 2007.
- [37] PARDO, Paula. Estudio de la estabilidad del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera (Ricinus communis L.). Trabajo de grado para optar al título ingeniero ambiental, Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería ambiental, Universidad libre de Colombia, Bogotá D.C., septiembre, 2015.
- [38] TEJADA, Candelaria, *et al.* Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. Manizales, Colombia, 2013.

- [39] ENCINAR, Jose; GONZALEZ, Juan & RODRIGUEZ Antonio, Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel Industrial & Engineering Chemistry Research 2005.
- [40] MATTINGLY, Brian. Production of Biodiesel from Chicken Fat Containing Free Fatty Acids, University of Arkansas. August, 2006.
- [41] NARASIMHARAO, Kondamudi, *et al.* A Green Process for Producing Biodiesel from Feather Meal. Journal of Agricultural and Food Chemistry. American Chemical Society, Vol. 57, No.14, 2009. p. 6163–6166.
- [42] CENGIZ, Oner & SEHMUS, Altun. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. Applied Energy, Vol. 86, No 10, 2009, p. 2114-2120.
- [43] RAMIREZ, Yusney. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.
- [44] ROJAS, Ingrid y DUEÑAS, Tatiana. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de grasa residual avícola, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia 2017.
- [45] RAMÍREZ, Jorge; MARTINEZ, Merced & FLORES, Horacio. Production of Biodiesel from Roasted Chicken Fat and Methanol : Free Catalyst,” vol. 8, no. 9, 2014.p. 1029-1032.
- [46] GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caraterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.

- [47] MAJEED, Abul and KHAN, Ljaz. Comparative Production of Biodiesel from Waste Chicken Fats and Cooking Oil, *IndianJournals.com*, vol. 5, no. 1, 2014. p. 32–40.
- [48] SANKAR, Shanmugasundaram. Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Stocks, vol. 4, no. May 2016, p. 114.
- [49] ZULETA, Ernesto; RIOS, Luis y CALDERÓN, Jorge. Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. Medellín: Universidad de Antioquia. Colombia 2012.
- [50] MARTINEZ ANAYA, Gilma Concepción; PONCE PORTILLO, Roberto Fernando y REYES GUTIERREZ, Laura Teresa. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. Trabajo de grado Ingeniero Químico. El Salvador: Universidad del salvador, 2007, 253p.
- [51] ABRAHAM, John & SARAVANAKUMAR, Ramesh. Yield and quality characteristics of Rendered Chicken Oil for Biodiesel Production. *Spinger AOCS*, 91 133-141. 2013. doi:10.1007/s11746-013-2346-5.
- [52] DEGOUY, Didier, *et al.* Biodegradable Muds: An Attractive Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling. *Society of Petroleum Engineers*, 1993. doi:10.2118/26737-MS.
- [53] Audibert, A, *et al.* Potential of New Drilling Formulations. *World Petroleum Congress*. 1997.

- [54] Amanullah, M. Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds. Society of Petroleum Engineers. 2005. doi:10.2118/97008-MS
- [55] MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos (2a. ed.). México, 2005.
- [56] GUTIERREZ PULIDO, Humberto. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill Interamericana, 2012. ISBN: 9786071507259

BIBLIOGRAFÍA

ABRAHAM, John & SARAVANAKUMAR, Ramesh. Yield and quality characteristics of Rendered Chicken Oil for Biodiesel Production. Springer AOCS, 91 133-141. 2013. doi:10.1007/s11746-013-2346-5.

AL-MEJED, Abdulaziz Abdullan & HOSSAIN, Enamul. A Fundamentals of sustainable drilling engineering. Canadá: scrivener publishing Wiley, 2015. ISBN 978-0-470-87817-0.

Amanullah, M. Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds. Society of Petroleum Engineers. 2005. doi:10.2118/97008-MS

ARÉVALO, Pablo; ULLOA, Jose. y ASTUDILLO, Servio. Obtención de biodiesel a partir de grasa bovina. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2008.

ASME shale shaker committee. Drilling fluids processing Handbook. Reino unido: Gulf professional publishing, 2004, ISBN 0-7506-7775-9.

AUDIBERT, A, *et al.* Potential of New Drilling Formulations. World Petroleum Congress. 1997.

AVELLANEDA., Fredy. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Universitat Rovira I Virgili, 2010.

BENAVIDES, Fabio. y QUINTERO Jimmy. Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa, Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos), Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Bucaramanga, 2010.

BERNA Tatiana y ILIA Ibis. Estudio de factibilidad del uso de glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2008.

CAENN, Ryen, *et al.* Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Ed. Gulf Professional Publishing, seventh Edition, E.U.A. 2016.

CARDONA, Carlos. Evaluación ambiental de residuos en la granja avícola CAFARI del municipio de San Pedro- Valle del Cauca, trabajo de grado para optar por el título de ingeniero ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente Programa de Ingeniería Ambiental Palmira 2015. p. 20-27.

CASTILLO, Álvaro. Evaluación y optimización de diferentes fluidos de perforación aplicados para el campo villano, operado por Agip Oil Ecuador, tesis de grado para obtener el título de ingeniero de petróleo, Guayaquil Ecuador, 2008.

CASTRO, Paula; COELLO, Javier y CASTILLO Liliana. Opciones para la producción uso de biodiesel en el Perú. 1ª Edición. Lima (Perú): Ediciones Soluciones prácticas, 2007. p.173.

CENGIZ, Oner & SEHMUS, Altun. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. Applied Energy, Vol. 86, No 10, 2009, p. 2114-2120.

CERVERO, José; COCA José y LUQUE Susana.; Production of biodiesel from vegetable Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Oviedo, 2008. p.76-83.

CORREIA, Joseph, *et al.* Formulación de un fluido de perforación base diesel de bajo impacto ambiental. Boletín de Geología, 37 (2) 2015. p.75-82

DEGOUY, Didier, *et al.* Biodegradable Muds: An Attractive Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling. Society of Petroleum Engineers, 1993. doi:10.2118/26737-MS.

DEMIRBAS Ayhan. Biodiesel, A realistic fuel alternative for diesel engines. Trabzon, turkia, mayo, 2007.

DEMIRBAS, Ayhan. Biodiesel production from vegetable oils by supercritical methanol. Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 64, November 2005, p. 858-865

DIAZ, Karen; y RAMIREZ, Karen. Acondicionamiento del aceite residual avícola y evaluación de uso potencial en la obtención de biodiesel. Trabajo de grado (ingeniero químico), Universidad Industrial De Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Bucaramanga 2016.

Drilling, completion and workover fluids. World Oil, publishing, 2008.

DURBIN, Thomas; JIANG, Michelle & MILLER, Wayne. Biodiesel fleet durability study, University of California, july 2010.

ENCINAR, Jose; GONZALEZ, Juan & RODRIGUEZ Antonio, Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel Industrial & Engineering Chemistry Research 2005.

GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.

GARCIA ALVAREZ, David. Estudio del efecto de la adición del compuesto z-trol 60 como emulsificante y humectante en fluidos de perforación base aceite. UCV. Venezuela 2002.

GONZALEZ, José Y MATTA, Gabriel. Factibilidad del uso de aceite mineral blanco grado técnico como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa, Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos), Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Bucaramanga, 2014.

GUARACHI Fredy. Guía de fluidos de perforación y laboratorio, Instituto Americano del Petróleo. Dallas, Texas 2005.

GUTIERREZ PULIDO, Humberto. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill Interamericana, 2012. ISBN: 9786071507259

HAWKER, David y VOGT, Karen. Manual de perforación datalog, procedimientos y operación en el pozo, marzo 2001.

INGENIERÍA EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN, Manual QMAX de fluidos de perforación. México.

JURJ, Adriana. Study of biodiesel fuel production through enzymatic methods, Babes-bolyai University, Faculty of chemistry and Chemical Engineering, Rumania, 2011.

LUZARDO, J; QUIROGA, F. y MARTÍNEZ, A. Evaluación de aceites minerales en lodos de emulsión inversa. Primer Seminario de Fluidos de Perforación y Completamiento de Pozos. Caracas – Venezuela, 1990.

MAJEED, Abul and KHAN, Ljaz. Comparative Production of Biodiesel from Waste Chicken Fats and Cooking Oil, *IndianJournals.com*, vol. 5, no. 1, 2014. p. 32–40.

MANUAL DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN ENERGY API, procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Dallas, Texas.

MARTINEZ ANAYA, Gilma Concepción; PONCE PORTILLO, Roberto Fernando y REYES GUTIERREZ, Laura Teresa. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. Trabajo de grado Ingeniero Químico. El Salvador: Universidad del salvador, 2007, 253p.

MATTINGLY, Brian. Production of Biodiesel from Chicken Fat Containing Free Fatty Acids, University of Arkansas. August, 2006.

MELLÍN, Jose. Estudio experimental para la evaluación de hundimiento de barita y acreción en sistemas base no acuosas empleados en la perforación de aguas profundas, Trabajo de grado (Ingeniero petrolero), Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería En Ciencias De La Tierra, México D.F., 2012.

M-I & SWACO. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0 Houston, Texas 2001.

MOLINERO, Laura. Producción de monoglicéridos por esterificación de glicerina con ácidos cinámico y p-metoxicinámico, Madrid, 2012.

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos (2a. ed.). México, 2005.

MOSER, Bryan. Biodiesel production, properties, and feedstock. In *Vitro Cellular & Developmental Biology* 2009, Vol. 45, No. 3, p.229-266

MUÑOZ HERNANDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CARDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2012.

NARASIMHARAO, Kondamudi, *et al.* A Green Process for Producing Biodiesel from Feather Meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. American Chemical Society, Vol. 57, No.14, 2009. p. 6163–6166.

PARDO, Paula. Estudio de la estabilidad del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera (Ricinus communis L.). Trabajo de grado para optar al título ingeniero ambiental, Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería ambiental, Universidad libre de Colombia, Bogotá D.C., septiembre, 2015.

PARSONS, C.P. Characteristics of Drilling Fluids, Society of Petroleum engineers. Tulsa, 1930. P.227–233.

PRIETO, Ali. Tecnología básica de los fluidos de perforación, manual técnico. Asesoría petrolera orientada, 2007.

RAMÍREZ, Jorge; MARTINEZ, Merced & FLORES, Horacio. Production of Biodiesel from Roasted Chicken Fat and Methanol : Free Catalyst,” vol. 8, no. 9, 2014.p. 1029-1032.

RAMIREZ, Yusney. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.

REIS, John. Enviromental control in petroleum engineering. First edition, Publishing, 1996. p.29-31.

RODRIGUEZ, Eliserio. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga 2007.

ROJAS, Ingrid y DUEÑAS, Tatiana. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de grasa residual avícola, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia 2017.

SANKAR, Shanmugasundaram. Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Stocks, vol. 4, no. May 2016, p. 114.

TEJADA, Candelaria, *et al.* Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. Manizales, Colombia, 2013.

THOMAS, D.; HSING, H. & MENZIE, D. Evaluation of Core Damage Caused by Oil-Based Drilling and Coring Fluids. Society of Petroleum Engineers. Houston Texas,1984.

VIVAS, Andrea. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino, Univesidad Tecnológica de Pereira, programa de Química Industrial, Pereira, Colombia, 2010.

ZULETA, Ernesto; RIOS, Luis y CALDERÓN, Jorge. Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. Medellín: Universidad de Antioquia. Colombia 2012.

ANEXOS

ANEXO A. NORMA UNE EN ISO 660: ACEITES Y GRASAS ANIMALES DE ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ Y DE LA ACIDEZ.

El índice de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de grasa y la acidez como el contenido de ácidos grasos libres determinado según el procedimiento especificado en esta norma internacional.

El índice de acidez se determina de la siguiente manera:

- Se prepara la solución patrón (KOH en etanol) a una concentración de 0,1 mol/l y se verifica esta concentración con la neutralización de ácido benzoico disuelto en 4-metil-2-pentanona.
- Se neutralizan 23 ml de 4-metil-2-pentanona con la solución patrón preparada.
- Para la preparación del patrón se disuelven de 0,05 a 1 g de ácido benzoico en la solución de 4-metil-2-pentanona neutralizada.
- Se neutraliza el patrón con la solución patrón preparada.

Para calcular la concentración del patrón se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{1000 * m_0}{122,1 * v_0}$$

Donde

m_0 = Masa en g de ácido benzoico usado, v_0 = Volumen en ml de solución patrón usada.

- Se miden 25 ml de 2- propanol con 4 gotas de fenolftaleína y se neutraliza con la solución patrón hasta producir un leve cambio de color.
- Se pesa en un matraz una masa suficiente de muestra.
- Se agrega el alcohol neutralizado a la porción de ensayo de aceite o grasa y se lleva a ebullición. Se valora con la solución patrón agitándose.

Finalmente, para calcular el índice de acidez se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{56,1 * V * c}{m}$$

Donde

V = Es el volumen en mililitros, de la solución volumétrica patrón de hidróxido de sodio o potasio usada, c = es la concentración exacta, en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de hidróxido de potasio o de sodio usada, m = es la masa, en gramos, de la porción de ensayo.

**ANEXO B. CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE METANOL Y CATALIZADOR
EN LA REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN.**

- Cálculos estequiométricos para relación metanol:aceite 7,5:1 y 1,25% H₂SO₄.

- Metanol necesario

$$300 \text{ g AEP} * \frac{1 \text{ mol aceite}}{858,21 \text{ g}} * \frac{7,5 \text{ mol metanol}}{1 \text{ mol AEP}} * \frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol metanol}} * \frac{1 \text{ ml}}{0,792 \text{ g}} = 105,93 \text{ ml}$$

- H₂SO₄ necesario

$$300 \text{ g Aceite} * \frac{1,25 \text{ g KOH}}{100 \text{ g Aceite}} * \frac{100 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{97 \text{ g puros H}_2\text{SO}_4} = 3,865 \text{ g H}_2\text{SO}_4$$

ANEXO C. REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN Y TRANSESTERIFICACIÓN.

Esterificación.



Transesterificación.



ANEXO D. CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE METANOL Y CATALIZADOR EN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN.

- Cálculos estequiométricos para relación metanol:aceite 6:1 y 0,5% KOH.

- Metanol necesario

$$300 \text{ g AEP} * \frac{1 \text{ mol A. Esterificado}}{858,21 \text{ g}} * \frac{6 \text{ mol metanol}}{1 \text{ mol AEP}} * \frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol metanol}} * \frac{1 \text{ ml}}{0,792 \text{ g}} \\ = 84,74 \text{ ml}$$

- KOH necesario

$$300 \text{ g A. Esterificado} * \frac{0,5 \text{ g KOH}}{100 \text{ g AEP}} * \frac{100 \text{ g KOH}}{85 \text{ g KOH}} = 1,765 \text{ g KOH}$$

$$300 \text{ g A. Esterificado} * \frac{0,6949 \text{ mg KOH}}{1 \text{ g AEP}} * \frac{1 \text{ g KOH}}{10^3 \text{ g KOH}} = 0,0209 \text{ g KOH}$$

$$\text{Catalizador total: } 1,765 + 0,0209 = 1,7859 \text{ g KOH}$$

ANEXO E. DISEÑO EXPERIMENTAL ROJAS Y DUEÑAS [44].

Prueba	Relación molar Metanol/Aceite esterificado	% p/p Catalizador	Tipo de Catalizador
1	6:1	0,5	KOH
2	6:1	1	KOH
3	9:1	0,5	KOH
4	9:1	1	KOH
5	6:1	0,5	NaOH
6	6:1	1	NaOH
7	9:1	0,5	NaOH
8	9:1	1	NaOH

**ANEXO F. NORMA EN 14103: PRODUCTOS DERIVADOS DE ACEITES Y
GRASAS. ESTERES METÍLICOS DE ÁCIDOS GRASOS (FAME).
DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE ESTER Y ESTER METÍLICO DE
ÁCIDO LINOLÉICO.**

El propósito es determinar el contenido de éster de los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME) destinados al uso como biocombustible puro o como un componente de las mezclas destinadas a calefacción o a combustibles diésel. También permite determinar el contenido de esteres del ácido linolénico. Permite verificar que el contenido de ésteres de los FAME es superior al 90% (m/m) y que el contenido en el ácido linolénico está comprendido entre el 1% (m/m) y el 15% (m/m)

El método resulta adecuado para FAME que contengan ésteres metílicos de longitud comprendida entre C14 y C24. Se determina el porcentaje del éster metílico del ácido linolénico presente en la muestra mediante cromatografía en fase gaseosa, utilizando calibración interna (heptadecanoato metílico).

El heptadecanoato metílico, disolución a 10 mg/ml, se llevan a un matraz aforado de 50 ml y se enrasa con heptano. Para la preparación de la muestra se debe pesar con precisión unos 250 mg de muestra y se añaden 5 ml de la disolución de heptadecanoato metílico utilizando una pipeta.

La determinación de éster, C, expresado como fracción de masa en tanto por ciento, se calcula utilizando la siguiente formula:

$$C = \frac{(\Sigma A) - A_{EI}}{A_{EI}} * \frac{C_{EI} * V_{EI}}{m} * 100\%$$

Dónde: ΣA = es el área total de los picos desde el del éster metílico C₁₄ hasta el del C_{24,1}; A_{EI} = es el área del pico correspondiente al heptadecanoato metílico; C_{EI} = es la concentración de la disolución de heptadecanoato metílico utilizada, en miligramos por mililitro; V_{EI} = es el volumen de la disolución de heptadecanoato metílico, en mililitros; m = es la masa de la muestra, en miligramos.

ANEXO G. CONDICIONES DE CROMATOGRAFÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL %FAME.

Detector FID a una temperatura de 250°C, flujo de aire de 400 ml/min, flujo de hidrógeno de 30 ml/min y flujo de helio de 25 ml/min, un inyector modo Split a una temperatura de 250°C, 25 psi de presión, flujo total de 91, 277 ml/min y flujo de purga de 3 ml/min, y un auto inyector con un volumen de inyección de 1 µL que hizo dos veces 4 lavados con el solvente metanol y 4 lavados con el solvente heptano y se hicieron 7 bombeos en la muestra; con una columna DB-WAX de longitud 30 m, 0,25 mm de diámetro, espesor de 0,25 µm y flujo de 1,7309 ml/min, con una rampa de calentamiento que entra a 150°C y permanece durante un minuto, sube 10°C/min hasta 210 °C y permanece 10 min y finalmente sube 15°C/min hasta 250°C y permanece cinco minutos teniendo como tiempo total 24,67 min [50].

ANEXO H. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LAS FORMULACIONES.

EVIDENCIA FOTOGRÁFICA FORMULACIÓN 90/10 DIESEL Y BIODIESEL.

Figura A.1 Formulación 90/10 Diesel y Biodiesel respectivamente



Figura A.2 Filtrado API Diesel y Biodiesel respectivamente.

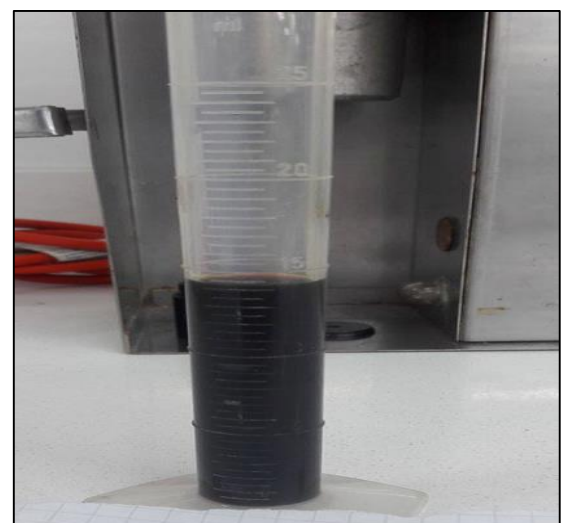
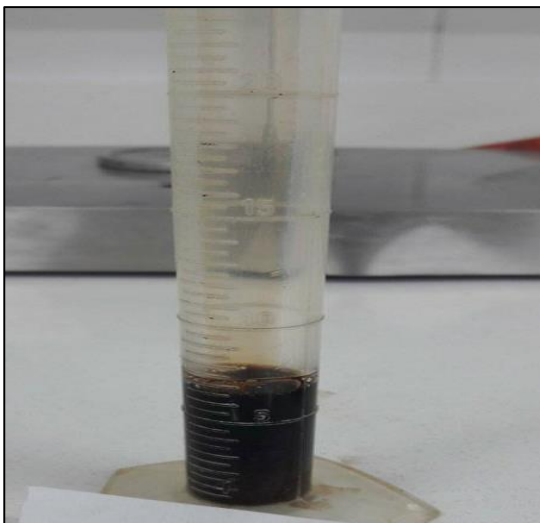
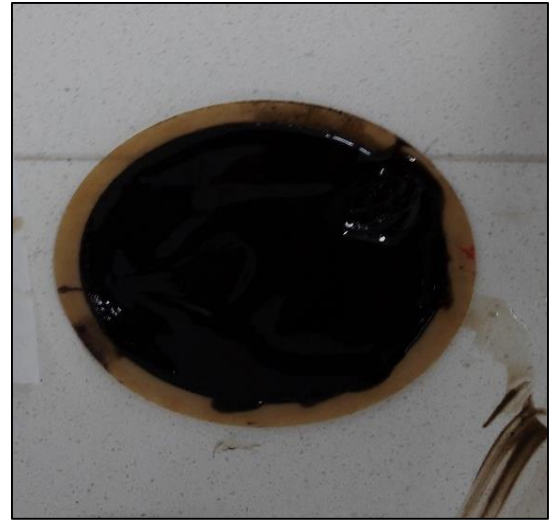
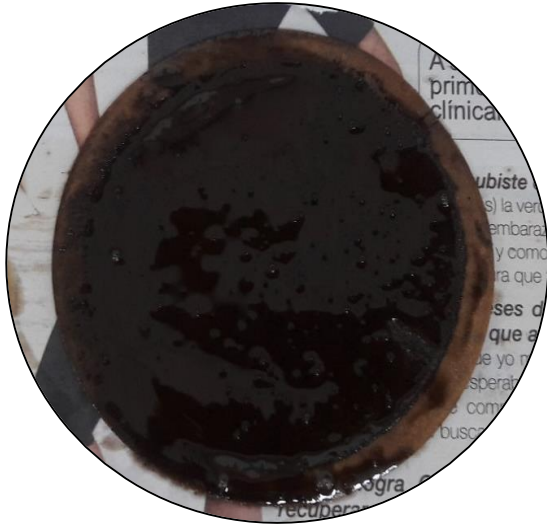


Figura A.3 Cake del diesel y biodiesel respectivamente.



EVIDENCIA FOTOGRÁFICA FORMULACIÓN 80/20 DIESEL Y BIODIESEL.

Figura A.4 Formulación 80/20 diesel y biodiesel respectivamente.

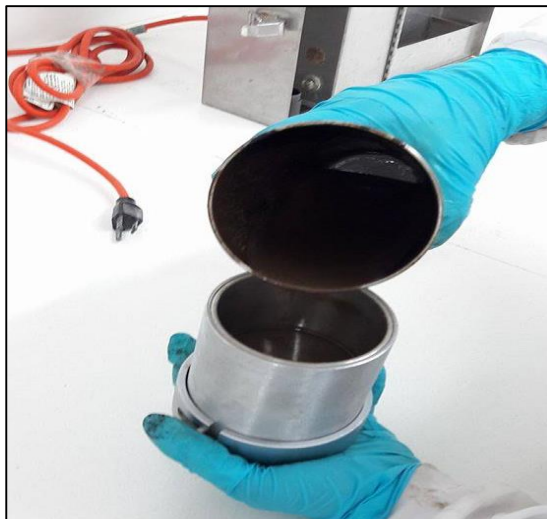


Figura A.5 Filtrado API, Diesel y Biodiesel respectivamente.

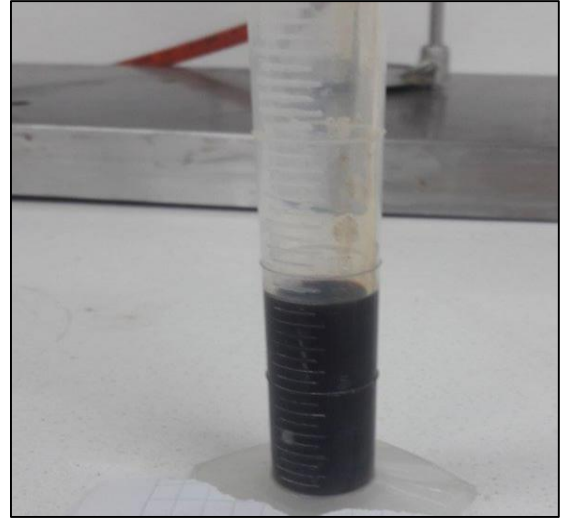


Figura A.6 Cake del diesel y biodiesel respectivamente.



EVIDENCIA FOTOGRÁFICA FORMULACIÓN 70/30 DIESEL Y BIODIESEL.

Figura A.7 Formulación 70/30 diesel y biodiesel respectivamente.

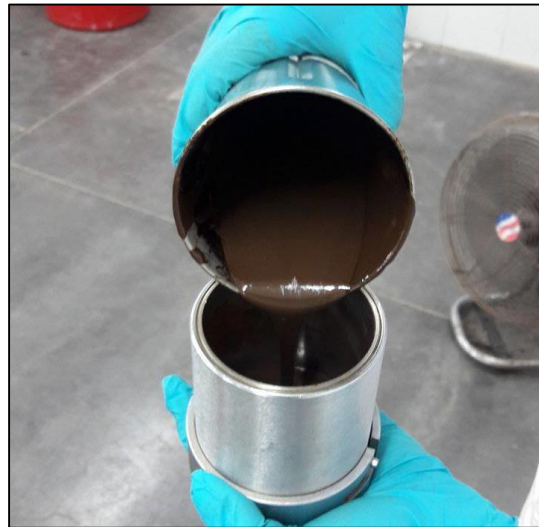


Figura A.8 Filtrado API diesel y biodiesel respectivamente.

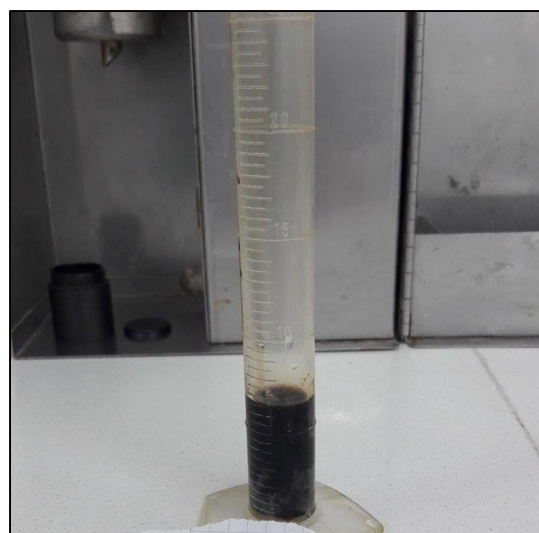
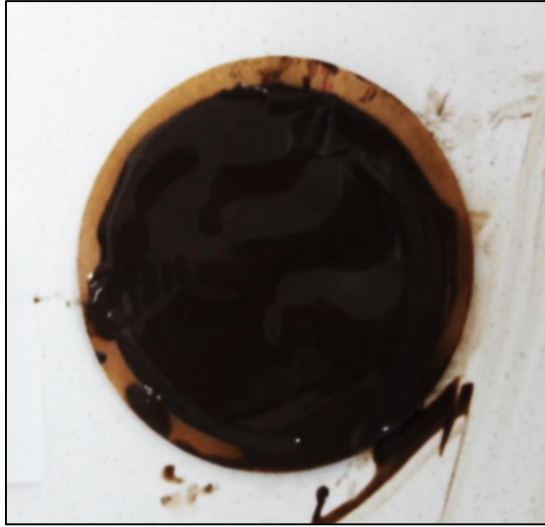


Figura A.8 Cake del diesel y biodiesel respectivamente.



EVIDENCIA FOTOGRÁFICA FORMULACIÓN 60/40 DIESEL Y BIODIESEL.

Figura A.9 Formulación 60/40 diesel y biodiesel respectivamente.



Figura A.10 Filtrado API diesel y biodiesel respectivamente.

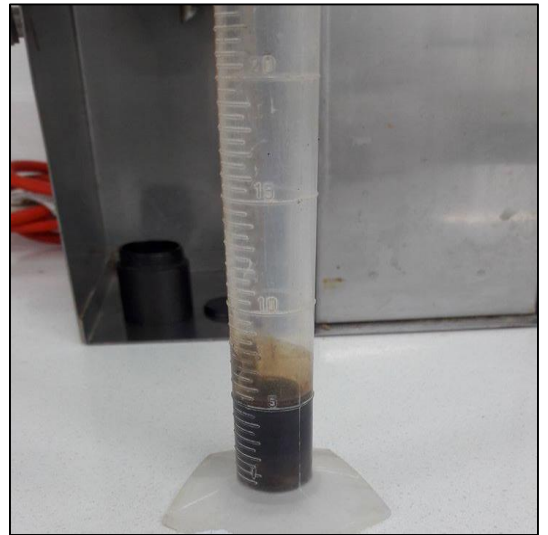


Figura A.11 Cake del diesel y biodiesel.

