

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE ACEITE
TRANSESTERIFICADO DE RICINO (*Ricinus Communis*) COMO FASE
CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA**

**MARIA ANGELICA CONSTANTE LÓPEZ
KAREN NATALIA PAEZ NIÑO**

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

2017

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE ACEITE
TRANSESTERIFICADO DE RICINO (*Ricinus Communis*) COMO FASE
CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA**

**MARIA ANGELICA CONSTANTE LÓPEZ
KAREN NATALIA PAEZ NIÑO**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:

Emiliano Ariza León

Ph.D. en Ingeniería Química

Co- director:

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Ph.D. en Ingeniería Química, Ambiental y Procesos.

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

2017

DEDICATORIA

A Dios por darme fortaleza en los momentos difíciles y por demostrarme que no importa cuán imposible parezcan las cosas, para Él todo es posible. Por acompañarme durante mi caminar por la vida, por la salud, mis seres queridos y todas las bendiciones que ha derramado sobre mí a lo largo de mi vida.

A mis padres, Carmen López y Sigifredo Constante, por ser mi apoyo constante, mi motor, mi ejemplo de vida, mis maestros en mi formación como persona llena de valores y principios. Por estar siempre conmigo cuando lo he necesitado. Por sus palabras de aliento y fuerza cuando las cosas se tornan difíciles, gracias a las cuales puedo seguir adelante y alcanzar mis metas. Pero sobre todo gracias por su inmenso amor. Este logro es para ustedes, los mejores padres que Dios me pudo regalar. Los amo inmensamente.

A mi tía Ana por sus consejos y su apoyo incondicional. A toda mi familia, por ese ejemplo de unidad y armonía, por ese sentido del humor y por estar ahí siempre sin importar las circunstancias. Son la mejor familia del mundo y me siento afortunada de pertenecer a ella.

A mi tía Inés por acogerme con los brazos abiertos como una madre durante esta etapa de mi vida y brindarme su amor. Por su paciencia y contribución en mi formación personal. Infinitas gracias por todo mi tía linda, preciosa y encantadora.

A Manny, por estar ahí en todo momento durante la culminación de esta fase de mi vida. Por ser esa voz de ánimo y fortaleza en los momentos en los cuales las cosas parecían imposibles. Por su amor, compañía y paciencia.

A Karen por su dedicación durante el desarrollo de este proyecto. A mis amigos y todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en mi formación tanto personal como profesional.

María Angélica Constante López

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido culminar esta etapa de mi formación profesional, por todas las bendiciones que me ha concedido y todas las personas maravillosas que ha puesto en mi vida.

A mis abuelos, Ana y Rubén, quienes han dado lo mejor de sí mismos para formarme. Por su esfuerzo, paciencia y dedicación durante todos estos años. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi papá, por su constante motivación y cariño. Por ser un gran padre, un amigo excepcional y un ejemplo a seguir. Por enseñarme a afrontar las dificultades y animarme a crecer tanto personal como académicamente.

A mi mamá, que a pesar de la distancia, ha encontrado la manera de apoyarme siempre.

Por todos los momentos que vivimos juntas y todos los sacrificios que hizo por mí.

A mi abuela Marlene, modelo de entrega y perseverancia, por su apoyo incondicional, sus buenos consejos y por motivarme a seguir siempre adelante.

A mis hermanitos, Anny, Ricardo y Samuel, que son mi adoración, por recordarme que debo ser mejor cada día.

A mis tíos, primos y demás familiares, por su voz de aliento y su compañía. Su presencia llena mi vida de alegría.

A mis amigos, con los que estudié, reí y compartí momentos inolvidables y en quienes encontré consuelo en los momentos difíciles.

A mi compañera de tesis, Mari, por su esfuerzo, dedicación y entrega en este proyecto, por todos los obstáculos que superamos juntas.

Sin ustedes, nada de esto sería posible.

Karen Natalia Páez Niño

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por haber contribuido en nuestro crecimiento como personas y formación como profesionales integrales.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos-UIS, y su personal docente, por brindarnos las herramientas necesarias para nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro director, Ph.D. Emiliano Ariza León, y codirector Ph.D. Fredy Avellaneda, por sus conocimientos, disposición, colaboración y apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Jaime Loza y Wilson Carreño, por su apoyo y colaboración, gracias a los cuales el desarrollo de este proyecto fue posible.

A Claudia, Rolando, Silvia, Moni y todo el personal del laboratorio del grupo de investigación de INTERFASE en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG) por hacer amena nuestra estadía en el laboratorio y por brindarnos su conocimiento y experiencia durante el desarrollo de la producción del aceite transesterificado de ricino.

Al ingeniero Mario Torres, por brindarnos su tiempo y espacio en el laboratorio de Lodos de la Universidad Industrial de Santander para llevar a cabo las pruebas necesarias para este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEÓRICO.....	23
1.1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	23
1.1.1. Funciones de los fluidos de perforación	23
1.1.1.1. Funciones principales	23
1.1.1.1.1. Control de presión de subsuperficie.....	23
1.1.1.1.2. Transporte de ripios	24
1.1.1.1.3. Soportar y estabilizar el pozo.....	24
1.1.1.2. Funciones secundarias	24
1.1.1.2.1. Soportar el peso de los tubulares	24
1.1.1.2.2. Enfriar y lubricar la broca	25
1.1.1.2.3. Transmitir la potencia hidráulica a la broca.....	25
1.1.1.2.4. Asistir en la recolección de datos geológicos de subsuperficie y de evaluación de formación	25
1.1.2. Clasificación de los fluidos de perforación.....	26
1.1.2.1. Lodos base agua.....	26
1.1.2.1.1. Lodos no inhibidores.....	26
1.1.2.1.2. Lodos inhibidores.....	26
1.1.2.1.3. Lodos poliméricos	27
1.1.2.2. Lodos neumáticos o aireados	27
1.1.2.3. Lodos base aceite	27
1.1.2.3.1. Sistemas de emulsión firme o apretada	28
1.1.2.3.2. Filtrado relajado	28
1.1.2.3.3. Alto contenido de agua	28

1.1.2.3.4. Fluido 100% Aceite	29
1.1.3. Propiedades fisicoquímicas de los fluidos base aceite.....	29
1.1.3.1. Densidad.....	29
1.1.3.2. Viscosidad.....	29
1.1.3.2.1. Viscosidad de embudo.....	30
1.1.3.3. Reología.....	30
1.1.3.3.1. Viscosidad aparente (VA)	31
1.1.3.3.2. Viscosidad plástica (VP)	31
1.1.3.3.3. Punto cedente (YP).....	32
1.1.3.3.4. Resistencia de gel.....	32
1.1.3.4. Filtrado	33
1.1.3.5. pH	34
1.1.3.6. Alcalinidad.....	34
1.1.3.7. Estabilidad Eléctrica.....	34
1.1.3.8. Porcentaje de líquidos y sólidos.....	35
1.1.4. Componentes del lodo base aceite	35
1.1.4.1. Aceite.....	35
1.1.4.2. Agua.....	36
1.1.4.3. Agente densificante	36
1.1.4.4. Agente viscosificante	36
1.1.4.5. Emulsificante.....	37
1.1.4.6. Controlador de filtrado.....	37
1.1.4.7. Fuente de Alcalinidad.....	37
1.1.4.8. Fuente de salinidad.....	38
1.1.4.9. Humectante.....	38
1.2. ACEITE DE RICINO.....	38
1.2.1. Propiedades.....	39
1.2.2. Composición.....	40
1.2.3. Transesterificación del aceite de ricino	41
1.2.3.1. Catálisis Ácida	41
1.2.3.2. Catálisis Básica.....	42

1.3. ANTECEDENTES DEL USO DE ACEITES VEGETALES COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN.....	44
--	----

2. METODOLOGÍA PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO.....49

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE RICINO.....	49
2.2. PRUEBAS PRELIMINARES DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO	50
2.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN	50
2.4. MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO	52
2.5. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO OBTENIDO	54
2.6. SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN	55

3. FORMULACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA UTILIZANDO ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO56

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	56
3.1.1. Reconocimiento y formulación del problema	57
3.1.2. Variables de operación	58
3.2. PRUEBAS PRELIMINARES AL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO.....	59
3.2.1. Caracterización del aceite transesterificado de ricino.....	59
3.2.2. Prueba de compatibilidad con los aditivos de los lodos de emulsión inversa..	60
3.2.3. Prueba de miscibilidad del aceite transesterificado de ricino con agua.....	63
3.3. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS.....	64
3.3.1. Formulaciones	64
3.3.3. Pruebas.....	65
3.3.2.1. Densidad.....	65
3.3.2.2. Reología.....	66

3.3.2.3. Filtrado API	67
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
4.1. RESULTADOS DE LA TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO ..	68
4.1.1. Caracterización del aceite de ricino.....	68
4.1.2. Pruebas preliminares de transesterificación del aceite de ricino	69
4.1.3. Análisis y selección de las condiciones de reacción	72
4.2. APLICACIÓN DEL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN	75
4.2.1. Caracterización del aceite transesterificado de ricino	75
4.2.2. Prueba de compatibilidad	78
4.2.3. Prueba de miscibilidad del aceite transesterificado de ricino con agua.....	79
4.2.4. Resultados de las formulaciones de los lodos.....	82
4.2.4.1. Relación O/W 85/15	82
4.2.4.2. Relación O/W 80/20	89
4.2.4.3. Relación O/W 75/25	95
5. CONCLUSIONES.....	101
6. RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFIA	104
ANEXOS.....	110

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Características sugeridas del aceite utilizado como base continua en la formulación de un fluido de perforación.	35
Tabla 2. Propiedades del aceite de ricino.	40
Tabla 3. Composiciones de ácidos grasos del aceite de ricino.	41
Tabla 4. Diseño de experimentos transesterificación.	51
Tabla 5. Matriz de experimentos transesterificación.	51
Tabla 6. Cantidades de aditivos agregados al aceite transesterificado de ricino para prueba de compatibilidad.	62
Tabla 7. Formulaciones lodos emulsión inversa.	65
Tabla 8. Pruebas preliminares con NaOH.	70
Tabla 9. Pruebas preliminares NaOH Y KOH.	71
Tabla 10. Pruebas con KOH variando la temperatura.	71
Tabla 11. Resultados de las reacciones de transesterificación del aceite de ricino.	72
Tabla 12. Resultados caracterización del biodiesel de ricino a utilizar en las formulaciones de lodos de emulsión inversa.	76
Tabla 13. Viscosidad cinemática del aceite transesterificado de ricino y diesel a distintas temperaturas.	77
Tabla 14. Resultado prueba de compatibilidad con cada uno de los aditivos.	78
Tabla 15. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 75/25.	79
Tabla 16. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 50/50.	80
Tabla 17. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 25/75.	80
Tabla 18. Resultados Formulación O/W 85/15.	82
Tabla 19. Reología Formulación O/W 85/15.	85
Tabla 20. Valores de n y k para la formulación 85/15.	89
Tabla 21. Resultados Formulación O/W 80/20.	90

Tabla 22. Reología Formulación O/W 80/20.....	92
Tabla 23. Valores de n y k para la formulación 80/20	95
Tabla 24. Resultados Formulación O/W 75/25.	95
Tabla 25. Reología Formulación O/W 75/25.....	98
Tabla 26. Valores de n y k para la formulación 75/25.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de esfuerzo de gel en lodos de perforación.	33
Figura 2. Planta Ricinus Communis.	39
Figura 3. Reacción general de transesterificación alcalina.	42
Figura 4. Etapas de reacción completa de transesterificación.	43
Figura 5. Montaje experimental de reacción de transesterificación.	52
Figura 6. Diagrama del procedimiento para la obtención de biodiesel a partir del aceite de ricino.	54
Figura 7. Registro fotográfico de los recipientes de la prueba de compatibilidad al inicio del periodo de prueba.	63
Figura 8. Variación de la viscosidad cinemática del diesel y del aceite transesterificado de ricino a distintas temperaturas.	77
Figura 9. Registro fotográfico de los recipientes de la prueba de compatibilidad al final del periodo de prueba.	79
Figura 10. Porcentaje de emulsión contra tiempo.	81
Figura 11. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 85/15.	84
Figura 12. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 85/15.	86
Figura 13. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 85/15.	86
Figura 14. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 80/20.	92
Figura 15. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 80/20.	93
Figura 16. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 80/20.	93
Figura 17. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 75/25.	97
Figura 18. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 75/25.	98
Figura 19. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 75/25.	99

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ficha técnica aceite de ricino (laboratorios león S.A.).....	110
Anexo B. UNE EN ISO 600.....	111
Anexo C. EN 14103	112
Anexo D. Cromatograma	113
Anexo E. Evidencias fotográficas.....	114
Anexo F. Gravedad API norma ASTM D 287 / API 2544.....	118
Anexo G. Punto de fuego y relampagueo norma ASTM D 92	119
Anexo H. Viscosidad saybolt norma ASTM D 88.....	120
Anexo I. Punto de fluidez norma ASTM D-97	121

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

OBM	: Oil Based Mud (Lodos base aceite)
API	: American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
TVD	: True Vertical Depth (Profundidad Vertical Verdadera)
HPHT	: High Pressure High Temperature (Alta Presión Alta Temperatura-APAT)
mL	: Mililitros
°F	: Grados Fahrenheit
°C	: Grados Centígrados
psi	: Pounds per square inch (Libras por pulgada cuadrada)
RPM	: Revoluciones Por Minuto
VA	: Viscosidad Aparente
VP	: Viscosidad Plástica
cP	: Centipoise
cSt	: CentiStoke
YP	: Yield Point (Punto cedente)
lb/100ft²	: Libras por cada cien pies cuadrados
pH	: Potencial de hidrógeno
ES	: Electrical Stability (Estabilidad eléctrica)
ppg	: Pounds per gallon (libras por galón - lb/Gal)
ppb	: Pounds per barrel (libras por barril - lb/Bbl)
mg KOH/g	: miligramos de hidróxido de potasio por gramo de muestra
% AGL	: Porcentaje de Ácidos Grasos Libres
% p/p	: Porcentaje en peso
RMA	: Relación Molar Alcohol/Aceite
% FAME	: Porcentaje de metil ésteres de ácidos grasos
O/W	: Relación aceite/agua

k : Índice de consistencia

n : Índice de comportamiento no newtoniano

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE ACEITE TRASESTERIFICADO DE RICINO COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE EMULSIÓN INVERSA*

AUTORES: María Angélica Constante López

Karen Natalia Páez Niño**

PALABRAS CLAVE: Lodos base aceite, emulsión inversa, transesterificación, biodiesel, aceite de ricino.

DESCRIPCIÓN:

En los sistemas de lodos base aceite (OBM) el fluido comúnmente utilizado como fase continua es el diesel. No obstante, éste presenta riesgos asociados a la salud y al medio ambiente dado su elevado contenido de hidrocarburos aromáticos. Es por esta razón que se ha venido estudiando el uso de fluidos base más biodegradables y menos tóxicos que éste.

En este trabajo se estudió la factibilidad técnica del uso del aceite transesterificado de ricino como fase continua en lodos de emulsión inversa. El aceite de ricino crudo fue sometido a reacciones químicas de transesterificación con el fin de reducir su viscosidad, para ello se varió la temperatura, la relación molar alcohol/aceite y el porcentaje de catalizador, para luego elegir las condiciones para producir el biodiesel de ricino a utilizar en los lodos. Una vez producido el aceite transesterificado se realizaron pruebas preliminares de caracterización y compatibilidad con los aditivos. Finalmente se prepararon las formulaciones de los lodos con el aceite transesterificado de ricino y diesel y se realizaron pruebas de reología y filtrado. La factibilidad del uso del aceite transesterificado de ricino como fase continua en los lodos base aceite se estableció mediante la comparación de resultados con los base diesel.

Mediante el proceso de transesterificación del aceite de ricino fue posible reducir la viscosidad considerablemente de 292 cP a valores entre 14,4 y 16,9 cP. En cuanto a los resultados de las pruebas de lodos se logró determinar que, desde el punto de vista reológico, es factible el uso de aceite transesterificado de ricino como fase continua en lodos de emulsión inversa, obteniendo los mejores resultados para la formulación de relación aceite/agua 85/15, y aunque la viscosidad es mayor que los base diesel, puede ser utilizado en lodos de perforación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ph.D. Emiliano Ariza León, Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL FACTIBILITY STUDY ABOUT THE USE OF TRANSESTERIFIED CASTOR OIL AS CONTINUOUS PHASE IN INVERT EMULSION DRILLING FLUIDS*

AUTHORS: María Angélica Constante López

Karen Natalia Páez Niño**

KEYWORDS: Oil-based drilling fluids, invert emulsion muds, transesterification, biodiesel, castor oil.

DESCRIPTION:

Diesel is commonly used as continuous phase in oil-based fluids systems. However, it implies several environmental and healthcare risks due to the high percentage of aromatic hydrocarbons which are contained in its structure. Therefore, the possibility of using less toxic and more biodegradable fluids as diesel substitutes in oil-based muds has been studied.

Using transesterified castor oil as continuous phase in invert emulsion drilling fluids was studied in this thesis in order to determinate whether or not this is viable technically. A series of transesterification reactions were carried out with the objective of reducing castor oil viscosity. For that purpose, the reaction parameters of temperature, alcohol/oil molar ratio and catalyst concentration, were modified. Afterwards, the optimal reaction conditions were chosen to produce the biodiesel which was used to prepare oil-based muds. Once the transesterified castor oil was produced, some preliminary characterization and compatibility tests were run. Lastly, rheology and filtration properties of diesel and biodiesel drilling fluids were measured and compared in order to establish the technical factibility of castor oil biodiesel as continuous phase in invert emulsion muds.

Through the process of transesterification of castor oil, it was possible to reduce de viscosity from 292 cP to values between 14, 4 and 16, 9 cP. The results of mud tests allowed to stablish that, from the rheological point of view, it is feasible the use of transesterified castor oil as continuous phase in invert emulsion drilling fluids, getting the best results for the formulation of oil/water ratio 85/15, and although the viscosity is higher than diesel based muds, it can be used in drilling fluids.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ph.D. Emiliano Ariza León, Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, la utilización de lodos base aceite (OBM) como fluido de perforación en los pozos, surgió bajo la necesidad de alcanzar objetivos cuyos ambientes no eran propicios para el empleo de lodos base agua tales como grandes profundidades, altas presiones, elevadas temperaturas, formaciones con lutitas reactivas, entre otros. El aceite principalmente utilizado como fase continua en los sistemas de lodo base aceite es el diesel. No obstante, éste presenta numerosos riesgos asociados a la salud y el medio ambiente dado su elevado contenido de hidrocarburos aromáticos. Adicionalmente, los lodos preparados con diesel deben ser tratados con el fin de cumplir con los requisitos ambientales para su disposición, lo cual se traduce en costos para las compañías petroleras.

Debido a dichos factores negativos que conlleva el uso del diesel, durante los últimos años las empresas han venido intentando mitigar el impacto ambiental causado por éste mediante la utilización de fluidos más biodegradables y menos tóxicos como sustitutos del diesel en los lodos de perforación¹. Así pues, en las investigaciones se han venido estudiando el uso de aceites vegetales ya que estos son biodegradables y reducen la contaminación significativamente. En la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander han sido analizados el aceite de palma, biodiesel, biodiesel de soya y glicerina. A su vez, en el ámbito internacional se han llevado a cabo diversas investigaciones con aceites vegetales como ajonjolí, coco, canola, entre otros, donde se analiza la viabilidad de utilizarlos en las formulaciones de lodos de perforación.

En este sentido, basados en un estudio previo² donde se analizaron las propiedades físicas y químicas del aceite de ricino postulándolo como posible candidato para la

¹ FADAIRO, Adesina, *et al.* Novel Formulation of Environmentally Friendly Oil Based Drilling Mud. *New Technologies in the Oil and Gas Industry*, 2012, p. 49-80. ISBN 978-953-51-0825-2.

² SETYAWAN, Wachid, *et al.* Alternative use of castor oil for vegetable oil-based mud environmentally friendly potential domestic oil based-mud. *Thirty-Fifth IPA Convention & Exhibition*, Indonesia. Mayo, 2011.

preparación de lodos base aceite, y dado que la planta *Ricinus communis* de la cual proviene este aceite se encuentra distribuida por varios países alrededor del mundo y en Colombia viene ganando terreno como una alternativa económica para la producción de aceites vegetales de uso industrial, se decidió realizar un estudio con dicho aceite. No obstante, debido a la excesiva viscosidad del aceite de ricino crudo para ser utilizado en los lodos de perforación, se resolvió someter éste a una reacción química de transesterificación, mediante la cual se obtiene el biodiesel de ricino, cuya viscosidad es menor.

Así pues, el presente trabajo de grado se enfocó en establecer la viabilidad técnica del uso del aceite transesterificado de ricino como fase continua en lodos de emulsión inversa brindando con ello un alternativa más amigable con el medio ambiente comparada con el diesel. Para lograr el objetivo principal del trabajo de grado, se realizó un proceso sistemático que inició con la revisión bibliográfica, seguido por la definición y puesta en marcha de la metodología y finalizando con el análisis e interpretación de resultados. Con base en esto, el contenido del presente estudio está distribuido en 4 capítulos. En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico, en el cual se presentan de manera sintetizada los conceptos y fundamentos teóricos necesarios para proceder con el desarrollo del proyecto, así como los antecedentes de la investigación. En el capítulo 2, se describe la metodología llevada a cabo para la transesterificación del aceite de ricino, esto incluye las pruebas preliminares, el diseño experimental y cómo se analizaron los resultados de las reacciones de transesterificación con el fin de elegir las condiciones para producir el biodiesel a utilizar en las formulaciones de lodos de emulsión inversa. En el capítulo 3, se explican las pruebas preliminares realizadas al aceite transesterificado de ricino obtenido así como las pruebas a las formulaciones de los lodos. Finalmente, en el capítulo 4, se presentan y analizan los resultados de la transesterificación, y se comparan los resultados obtenidos para los lodos base aceite transesterificado de ricino con los base diesel.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Se denomina lodo de perforación a un fluido que es circulado en pozos de petróleo y gas para limpiar y acondicionar el hoyo. Un lodo ideal es aquel que tiene las características físicas y químicas necesarias para realizar sus funciones, permitiendo así, una operación de perforación segura, óptima y económicamente viable.

1.1.1. Funciones de los fluidos de perforación

Los lodos de perforación están diseñados y formulados para llevar a cabo tres funciones principales. Adicionalmente, se les atribuye otras funciones, denominadas secundarias, que junto con las principales serán definidas a continuación.

1.1.1.1. Funciones principales

1.1.1.1.1. Control de presión de subsuperficie

El control de la presión de subsuperficie se da por medio de la presión hidrostática de la columna de fluido que depende directamente de la densidad del lodo y la profundidad vertical verdadera (TVD por sus siglas en inglés). El lodo de perforación debe superar la tendencia del hueco a colapsar debido a la inestabilidad del pozo la cual es una función natural de los esfuerzos mecánicos desiguales, las presiones creadas y las superficies expuestas en el proceso de perforación. La falla en el

control de las presiones en el fondo de pozo puede generar escapes de gas, patadas de pozo o explosiones³.

1.1.1.1.2. Transporte de ripios

El fluido proveniente de los orificios de la broca ejerce un efecto de chorro sobre los recortes ubicados en el fondo de pozo y los lleva hasta superficie. Si los recortes generados en la cara de la broca no son removidos inmediatamente y dirigidos hacia la superficie, estos serán molidos por la broca y se pegarán a ésta, retardando la penetración efectiva de la misma. Asimismo, los lodos de perforación deben tener la capacidad de suspender los sólidos perforados en las operaciones de conexión, viajes de la broca y corrida de registros, de lo contrario, se asentarán en la parte baja del pozo³.

1.1.1.1.3. Soportar y estabilizar el pozo

La fuerza limitante que ejerce el fluido de perforación actúa a través de la torta de lodo o cake que ayudará a estabilizar físicamente la formación. La estabilidad del pozo también se mantiene o aumenta por medio del control de pérdida de filtrado hacia las formaciones permeables³.

1.1.1.2. Funciones secundarias

1.1.1.2.1. Soportar el peso de los tubulares

La flotabilidad es definida como la fuerza ascendente que actúa sobre un objeto colocado en un fluido. En este caso, la fuerza de flotabilidad ejercida por el lodo en dirección contraria al peso de la sarta de perforación soporta parte de la misma. El factor de flotabilidad se utiliza para relacionar la densidad del lodo desplazado con

³ Amoco Production Company. Drilling Fluids Manual. Amoco Corporation, 1994.

la densidad de la sarta, por ende, cualquier aumento en la densidad del lodo da como resultado un aumento en la flotabilidad⁴.

1.1.1.2.2. Enfriar y lubricar la broca

El contacto entre la broca y el pozo genera un torque y fricción considerable durante la perforación, lo que termina liberando una gran cantidad de energía en forma de calor que es evacuado por el fluido de perforación reduciendo así la posibilidad de la falla prematura de la broca y daño de la tubería. Además, actúa como lubricante minimizando el torque que realiza la sarta de perforación⁴.

1.1.1.2.3. Transmitir la potencia hidráulica a la broca

La potencia hidráulica generada en la broca es el resultado del volumen de flujo y caída de presión a través de los orificios de la broca. Esta energía es convertida en energía mecánica, la cual remueve los recortes del fondo del pozo y aumenta la velocidad de penetración⁴.

1.1.1.2.4. Asistir en la recolección de datos geológicos de subsuperficie y de evaluación de formación

La recolección e interpretación de datos geológicos de superficie provenientes de rípios, núcleos de perforación y registros eléctricos se usa para determinar el valor comercial de las zonas penetradas por el lodo. La invasión de estas zonas por parte del fluido o su filtrado pueden interferir con la interpretación de los datos recuperados⁴.

⁴ Amoco Production Company, *Op cit.*

1.1.2. Clasificación de los fluidos de perforación

Los fluidos de perforación se dividen principalmente en: lodos neumáticos, base agua y base aceite.

1.1.2.1. Lodos base agua

Su fase continua es el agua. Son los lodos más se emplean en la industria a nivel mundial debido a que son fáciles de preparar, baratos de mantener y sirven para superar la mayoría de problemas comunes durante la perforación. Se clasifican en tres tipos: no inhibidores, inhibidores y poliméricos⁵.

1.1.2.1.1. Lodos no inhibidores

Son aquellos que no detienen significativamente el hinchamiento de las arcillas. En general se componen de bentonita comercial con algo de soda cáustica o cal. Pueden contener también defloculantes y/o dispersantes tales como: lignitos, lignosulfonatos o fosfatos⁵.

1.1.2.1.2. Lodos inhibidores

Son aquellos que retardan en gran medida la hinchazón de la arcilla y alcanzan la inhibición a través de la presencia de cationes, típicamente sodio, calcio y potasio. Generalmente la combinación de los cationes de calcio y potasio ofrecen una mayor inhibición a la dispersión de arcilla. Estos sistemas generalmente se usan para la perforación de arcillas hidratables y arenas sucias que las contengan. Debido a que la fuente del catión es una sal, la disposición de estos lodos representa un porcentaje significativo en su costo de implementación⁵.

⁵ Amoco Production Company, *Op cit.*

1.1.2.1.3. Lodos poliméricos

Son aquellos que se basan en el uso de micromoléculas o polímeros los cuales brindan las propiedades al lodo. Estos fluidos pueden ser inhibidores o no inhibidores dependiendo del uso de un catión inhibidor. Los polímeros pueden ser utilizados como viscosificantes, controladores de filtrado, desfloculantes de sólidos, entre otros. Su costo dependerá directamente de las micromoléculas utilizadas⁶.

1.1.2.2. Lodos neumáticos o aireados

Son lodos en los cuales la fase continua es aire. Se utilizan para la perforación de zonas agotadas o áreas donde las presiones de formación son bajas. Una ventaja de estos tipos de lodos es el aumento visible en las velocidades de penetración. Sin embargo, los lodos neumáticos son ineficientes en áreas donde hay grandes volúmenes de fluidos de formación, lo que podría ocasionar una pérdida de circulación o daño a una formación. Otra consideración cuando se selecciona éste tipo de lodo es la profundidad del pozo que no debe superar los 10.000 pies puesto que los volúmenes de aire/gas requeridos para transportar los ripios podrían superar la capacidad de los equipos de superficie⁶.

1.1.2.3. Lodos base aceite

El principal uso de los lodos base aceite es la perforación de shales problemáticos y formaciones que requieran de un aumento en la estabilidad del hueco. Su uso también es común en perforación de pozos muy desviados debido a su alto grado de lubricidad y su habilidad en la prevención en la hidratación de arcillas. Asimismo, pueden ser seleccionados para aplicaciones especiales tales como zonas de altas presiones y temperaturas, la necesidad de minimizar el daño a formaciones con alta presencia de contaminantes como la sal, el dióxido de carbono y algunos gases ácidos. Debido a la actual preocupación ambiental, la implementación de lodos base

⁶ Amoco Production Company, *Op cit.*

aceite es restringida en muchas áreas donde se requiere que tanto los lodos como los ripios sean almacenados, transportados y tratados antes de ser dispuestos en un sitio adecuado para tal fin, lo que aumenta significativamente los costos de utilización de este sistema en comparación con los sistemas de fluidos base agua⁷.

Dentro de los lodos base aceite se tienen básicamente cuatro sistemas cuyas características se analizan a continuación.

1.1.2.3.1. Sistemas de emulsión firme o apretada

Estos sistemas de emulsión ofrecen estabilidad a alta temperatura (hasta 500 °F) y tolerancia a los contaminantes. Además, los lodos de emulsión firme usan altas concentraciones de emulsionantes y agentes de pérdida de fluido para maximizar la estabilidad de la emulsión y minimizar la pérdida de filtrado. El volumen del filtrado APAT es comúnmente menor de 15 mL y debe ser todo aceite⁷.

1.1.2.3.2. Filtrado relajado

Sus concentraciones de emulsionante y agente de control de filtrado son muy bajas. El aumento de su filtrado en esos sistemas permite una mayor velocidad de perforación de la que es posible con los sistemas de emulsión firme. El volumen de la pérdida de filtrado APAT es de 15 a 20 mL. Estos sistemas son estables a temperaturas de hasta 235 °F⁷.

1.1.2.3.3. Alto contenido de agua

Los sistemas de alto porcentaje de agua fueron desarrollados para usar en áreas en las que las descargas de aceite son restringidas, como en el Mar del Norte. Estos

⁷ BAROID. Manual de Fluidos. Baroid/Halliburton Energy Services Inc. Houston, TX, USA, 1999.

sistemas pueden reducir hasta en un 45 por ciento el aceite que queda en los recortes. No son recomendados a temperaturas superiores a 250 °F⁸.

1.1.2.3.4. Fluido 100% Aceite

Es utilizado cuando se prevé que la temperatura de fondo y la temperatura de circulación en fondo estarán en el rango de 350 a 425 °F. Se usa principalmente para la extracción de núcleos de roca debido a que es el fluido de mayor compatibilidad con el presente en el yacimiento y de esta manera se evita la alteración de las propiedades de la roca (núcleo extraído) que son fundamentales para posteriores estudios⁸.

1.1.3. Propiedades fisicoquímicas de los fluidos base aceite

1.1.3.1. Densidad

Es la masa por unidad de volumen de un fluido de perforación. Esta propiedad define la capacidad del fluido de perforación de ejercer una contrapresión en las paredes del hoyo, controlando con ello la presión hidrostática y litostática las cuales están presentes en las formaciones perforadas. Esta propiedad debe ser inspeccionada continuamente mediante el uso de la balanza de lodos⁹.

1.1.3.2. Viscosidad

Es la resistencia interna que presenta un fluido a fluir. En los fluidos de perforación es una medida de la capacidad de los mismos para lograr una limpieza adecuada

⁸ BAROID, *Op cit.*

⁹ BERNA ARTEAGA, Tatiana. e ILIAS MELGAREJO, Ibis. Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Bucaramanga, 2008.

del pozo, manteniendo suspensión de los recortes y facilitando su decantación en la zaranda¹⁰.

1.1.3.2.1. Viscosidad de embudo

La viscosidad de embudo es una propiedad cualitativa que consiste en medir el tiempo requerido para que una muestra de lodo fluya a través de un embudo Marsh. Está dada en segundos por cuarto de galón (s/qt) dado que la prueba consiste en medir el tiempo que le toma a un cuarto de galón de la muestra de lodo en fluir del embudo inicialmente lleno a la copa de lodo¹¹.

1.1.3.3. Reología

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Esta ciencia está relacionada con los esfuerzos cortantes que se generan mientras el fluido de perforación fluye, las fuerzas estáticas de gel necesarias para la suspensión de sólidos cuando la circulación se detiene y la capacidad de transportar los recortes hasta la superficie.

La reología del lodo se mide continuamente durante la perforación de los pozos con el fin de establecer si es necesario ajustarla con aditivos o dilución para cumplir con los requerimientos de la operación¹¹.

La viscosidad puede ser definida en términos reológicos como el cociente entre el esfuerzo cortante de un fluido y la correspondiente velocidad de corte.

$$\mu = \frac{\text{Esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{Velocidad de corte } (\gamma)}$$

¹⁰ M-I & SWACO. Drilling Fluids Engineering Manual, 2001.

¹¹ GUARACHI LAURA, Fredy. Guía de fluidos de perforación y laboratorio. [En línea]. (Recuperado el 30 de Noviembre de 2016). Disponible en <http://es.slideshare.net/Rolando000/guia-de-fluidos-de-perforacin>.

Donde:

- Velocidad de corte, γ (seg⁻¹): es la velocidad relativa de una lámina moviéndose junto a otra, dividida por la distancia entre ellas.
- El esfuerzo de corte, τ (lb/ 100ft²): es la fuerza necesaria por unidad de superficie requerida para mover un fluido a una velocidad de corte dada; esto es, la fuerza mínima que se requiere para mover un fluido.

1.1.3.3.1. Viscosidad aparente (VA)

Es una medida relativa de la resistencia del fluido a la fluencia por efectos de cohesión y adhesión causados por las partículas suspendidas en el lodo. Esta viscosidad es la mitad de la indicación en el viscosímetro de lodo a 600 RPM ($\theta 600$). Se reporta en cP o mPa.seg¹².

$$VA = \frac{\theta 600}{2}$$

1.1.3.3.2. Viscosidad plástica (VP)

Es la parte de la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica, afectada principalmente por la concentración de sólidos, tamaño y forma de las partículas, la presencia de algunos polímeros de cadena larga, la relación aceite/agua (O/W) en los fluidos de emulsión inversa y la viscosidad de la fase continua. Es calculada como la diferencia entre la lectura del viscosímetro de lodo a 600 RPM y la indicación a 300 RPM. Se reporta en cP o mPa.seg¹².

$$VP = \theta 600 - \theta 300$$

En el campo la VP se considera como una guía para el control de sólidos dado que ésta se incrementa conforme el porcentaje volumétrico de los sólidos se incrementa.

¹² GUARACHI, *Op cit.*

1.1.3.3.3. Punto cedente (YP)

Es una medida de la resistencia inicial al flujo que se da debido a las fuerzas electroquímicas entre las partículas en un fluido, las cuales son causadas por cargas localizadas en la superficie de las partículas dispersas en la fase continua. Así pues, el punto de cedencia depende de las propiedades superficiales de los sólidos del lodo, la concentración volumétrica de los sólidos y el ambiente iónico del líquido que rodea a las partículas¹³.

El punto de cedencia se calcula como la diferencia entre la indicación del viscosímetro de lodo a 300 RPM y la viscosidad plástica y se reporta en lb/100ft².

$$YP = \theta 300 - VP$$

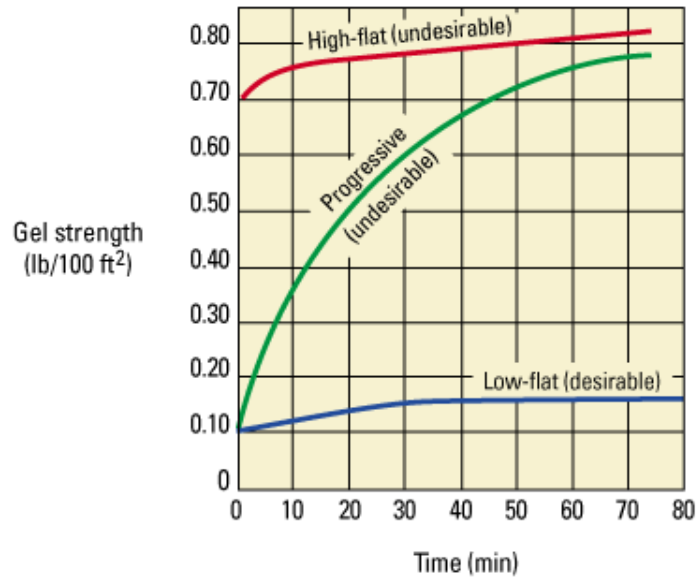
1.1.3.3.4. Resistencia de gel

Es una medida de la fuerza de atracción a condiciones estáticas debido la presencia de partículas cargadas eléctricamente. Depende principalmente de la cantidad y tipo de sólidos en suspensión, la temperatura, el tiempo de reposo o no circulación y el tratamiento químico. Los tiempos a los cuales suele calcularse esta fuerza de gel a los 10 segundos y 10 minutos¹³.

Una excesiva fuerza de gel, la cual es causada por alta concentración de sólidos, es un indicativo de problemas con las propiedades reológicas del lodo, dado que esto implica un aumento de viscosidad, gelificación y filtrado. Cuando existe una gran diferencia entre el gel inicial y el de 10min, se considera un “gel progresivo” lo cual no es deseable dado que la fuerza requerida para iniciar el movimiento aumentará progresivamente. Si los dos valores son altos sin diferencia apreciable, el gel se denomina “High-flat Gels” los cuales también son indeseables. La condición de plana baja permite una suspensión de los recortes y es la condición deseable¹³. En la Figura 1 se muestran estos tres tipos de tendencia para la resistencia gel.

¹³ GUARACHI, *Op cit.*

Figura 1. Tipos de esfuerzo de gel en lodos de perforación.



Fuente: Resistencia de gel, Shlumberger, <http://www.glossary.oilfield.slb.com>

1.1.3.4. Filtrado

La filtración es el proceso mediante el cual la fase líquida del lodo de perforación entra a la formación dado que la presión hidrostática generada por la columna de fluido es mayor que la presión de formación. Este proceso puede ocurrir bajo condiciones estáticas en las que el espesor de la torta depositada durante la filtración aumenta con el tiempo, o bajo condiciones dinámicas en las cuales la torta es más delgada y hay mayores pérdidas de filtrado¹⁴.

Para determinar el filtrado de un fluido de perforación existe el método de filtrado API a presiones moderadas (100 psi) y temperatura ambiente, el método alta presión alta temperatura (HPHT por sus siglas en inglés) a 500 psi y 250 °F o más, el filtrado PPT (Prueba de Taponamiento de Permeabilidad) a 1000 psi y 250 °F o más y el filtrado FANN 90 que es una filtración dinámica a alta presión y alta temperatura.

¹⁴ M-I & SWACO, *Op cit.*

1.1.3.5. pH

El potencial de hidrógeno (pH) es una medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Los valores de pH bajos indican acidez, mientras que altos valores corresponden a sustancias básicas. En los lodos de perforación este valor debe ser alcalino con el fin de prevenir corrosión en la tubería y mantener las propiedades reológicas del lodo¹⁵.

1.1.3.6. Alcalinidad

Es una medida de la cantidad total de iones hidroxilo (OH-) en una solución. En los lodos de perforación este parámetro es medido directamente en el lodo y conocido como Pm (Punto final de fenolftaleína del lodo) o en filtrado como Pf (alcalinidad de fenolftaleína del filtrado de lodo) o Mf (punto final de anaranjado de metilo del filtrado de lodo). El punto final "P" está en un pH de 8,3 y el punto final "M" está en un pH de 4,3. Ambos se expresan en cc de ácido/ cc muestra¹⁶.

1.1.3.7. Estabilidad Eléctrica

La estabilidad eléctrica (ES) es una medida de la estabilidad de la emulsión. Para ello se mide el voltaje de la emulsión que depende del grado de dispersión de las gotas de agua. Si las gotas están bastante dispersas el voltaje será alto y disminuye a medida que las gotas de agua coalescen; entre más fuerte sea la emulsión, mayores serán los voltajes. Entre los factores que afectan la estabilidad eléctrica están: contenido de agua, sólidos humectados, temperatura, emulsificación, entre otros¹⁷.

¹⁵ Baker Hughes INTEQ. Fluidos Manual de Ingeniería. Baker Hughes Incorporated. Houston, TX, USA, 1998.

¹⁶ M-I & SWACO, *Op cit.*

¹⁷ BERNA, T. e ILIAS, I., *Op cit.*

1.1.3.8. Porcentaje de líquidos y sólidos

Para determinar la cantidad de líquidos y sólidos en un fluido de perforación se emplea la prueba de la retorta. Para ello, la muestra de lodo se coloca en una cámara de acero de un volumen determinado y se calienta vaporizando los componentes líquidos. Los vapores se condensan y el líquido se recolecta en un cilindro graduado usualmente en porcentajes; el volumen de líquidos y los sólidos se miden en porcentajes¹⁸.

1.1.4. Componentes del lodo base aceite

1.1.4.1. Aceite

Las características que debe tener el aceite utilizado como base en lodos de perforación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características sugeridas del aceite utilizado como base continua en la formulación de un fluido de perforación^{19,20}.

Característica	Recomendado
Punto de inflamación	≥ 180 °F
Punto de fluidez	Bajo
Toxicidad	Lo menor posible
Punto de anilina	≥ 140 °F

El punto de anilina debe ser alto con el fin de evitar el deterioro de empaques o partes de goma. Asimismo, el punto de inflamación debe ser elevado para reducir

¹⁸ BAROID, *Op cit.*

¹⁹ PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo CIED, 2002.

²⁰ AGWU, Okorie; ISEMIN, Isemin and AKPABIO, Moses. Cost Benefit Analysis of Vegetable Oils Used As Alternatives to Diesel in the Formulation of Oil-Based Drilling Muds. En: Society of Petroleum Engineers, SPE-178265-MS, Agosto, 2015.

los riesgos de incendio y el punto de fluidez bajo para permitir su empleo en ambientes fríos¹⁹.

El aceite base más utilizado es el diesel, sin embargo es bastante tóxico debido a su alto contenido de aromáticos. Existen otros tipos de aceites utilizados como esterres, éteres, polialfaoleinas o los aceites vegetales esterificados²¹.

1.1.4.2. Agua

En los lodos base aceite el agua suele estar en proporciones hasta de un 50% en volumen con el fin de mejorar la reología del fluido. Esta agua es incorporada generalmente como salmuera dado que las sales controlan la actividad química entre el fluido y las formaciones²². Contribuye a la viscosidad, fuerza gel y control de filtrado debido a que las pequeñas gotas de agua dispersas en el aceite actúan como sólidos.

1.1.4.3. Agente densificante

Los densificantes más utilizados en los fluidos base aceite son la barita y carbonato de calcio²¹.

1.1.4.4. Agente viscosificante

En los sistemas base aceite se utilizan arcillas organofílicas como viscosificantes, las cuales además de contribuir a las propiedades reológicas, mejoran la capacidad

²¹ MUÑOZ HERNÁNDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2012.

²² PDVSA, *Op cit.*

de suspensión y limpieza del pozo mediante un aumento del punto cedente y del esfuerzo de gel²³.

1.1.4.5. Emulsificante

Al adicionar este producto a la formulación del lodo, se favorece la formación de la emulsión de agua en aceite creando un sistema estable. Los emulsificantes se activan con el calcio contenido en la cal, debido a que éste crea un detergente que emulsiona las gotas de agua en la fase continua. Asimismo, los emulsificantes están constituidos molecularmente por dos grupos; en el caso de fluidos de emulsión inversa, el grupo del emulsificante compatible con el agua puede ser un alcohol, amina, ácido o sal; y la compatibilidad con el aceite se logra con un grupo graso. En las formulaciones suelen utilizarse ácidos grasos con cadenas de hidrocarburos entre 12 y 20 en conjunto con hidróxido de calcio²⁴.

1.1.4.6. Controlador de filtrado

El controlador de filtrado es opcional, sin embargo, en ciertos casos como altas temperaturas, la adición de este aditivo al fluido de se hace necesaria. Los más utilizados son los lignitos organofílicos y los aditivos asfálticos²⁵.

1.1.4.7. Fuente de Alcalinidad

El aditivo más utilizado como fuente de alcalinidad es la cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el cual se encarga de favorecer un pH básico del lodo, con el fin de evitar problemas de corrosión. Además, mejora la acción del emulsificante²⁵.

²³ PINZON BELLO, Jorge Alejo. Suspensions Viscosity of a Natural and Organophilic Bentonite. En: Revista Colombiana de Química. Julio-Diciembre, 2006, vol.35, no.2, p. 225-232.

²⁴ M-I & SWACO, *Op cit.*

²⁵ BENAVIDES AYALA, Fabio Ernesto y QUINTERO GÓMEZ, Jimmy. Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2010.

1.1.4.8. Fuente de salinidad

Se utilizan sales inorgánicas, cloruro de sodio y calcio, las cuales desarrollan fuerzas osmóticas para deshidratar y balancear formaciones sensibles al agua cuando se perfora con emulsiones inversas²⁶.

1.1.4.9. Humectante

Este componente es un emulsificante no iónico que ayuda a la dispersión de los sólidos incorporados manteniéndolos humedecidos por aceite. El humectante tiene un extremo que es soluble en la fase oleosa y otro que tiene afinidad por las superficies de los sólidos²⁶. Suelen ser poliamidas, amidas, fosfatos orgánicos, hidrocarburos sulfonados, entre otros.

1.2. ACEITE DE RICINO

El aceite de ricino se extrae de las semillas de la planta *Ricinus Communis*, comúnmente conocida como Higuierilla. La planta (Figura 2) es un arbusto que tiene una altura hasta 4 metros, hojas de forma estrellada y flores blancas con frutos espinosos que contienen las semillas.

Su cultivo es viable en la mayoría de climas cálidos y templados (0 a 30 °C) cuya altura sobre el nivel del mar varía entre 0 y 2500 metros, sin embargo, su contenido de aceite es inversamente proporcional a la altitud en la que se encuentre. Puede ser cultivada en suelos de mediana o alta fertilidad, permeables, aireados y con pH por encima de 5,5 siendo óptimo en un rango de 6 a 7²⁷.

²⁶ PDVSA, *Op cit.*

²⁷ RAMIREZ, Luis Enrique y CARDENAS CHALA, Diego Leandro. Evaluación del proceso de producción de la higuierilla como alternativa energética de bajo nivel de contaminación ambiental. Tesis de Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Bogotá D.C., 2005.

De acuerdo a lo señalado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, que desde el año 2006 ha venido realizando una investigación titulada “*Higuerilla: Alternativa Productiva, Energética y Agroindustrial para Colombia*”, el cultivo de Higuerilla en Colombia se expandirá con el fin de suplir la demanda interna del aceite producido a partir de esta planta, el cuál es importado en su mayoría actualmente lo que incrementa su costo. Además, dicha expansión permitirá un mejoramiento en la competitividad del sistema productivo de la planta que sirve como materia prima para varios productos industriales en el país.

Figura 2. Planta Ricinus Communis.



Fuente:<http://luirig.altervista.org/pics/index5.php?recn=40730&page=1>

1.2.1. Propiedades

El aceite de ricino, como todos los aceites vegetales, tiene diferentes propiedades físicas y químicas que varían según el método de extracción. En la Tabla 2 se muestran algunas de las propiedades del aceite de ricino de acuerdo al método de extracción. El valor de yodo (IY) es una medida de la insaturación de los componentes de una grasa; se define como los gramos de yodo absorbidos por 100 gramos de grasa. Por otra parte, el valor de saponificación es una medida

aproximada del peso molecular promedio de los ácidos grasos; se define como el número de miligramos de KOH necesarios para saponificar un gramo de grasa bajo condiciones específicas y se utiliza para comprobar la pureza de las grasas y aceites²⁸.

Tabla 2. Propiedades del aceite de ricino.

Propiedades	Aceite prensado en frío	Aceite extraído por solvente	Aceite deshidratado
Gravedad Específica	0.961-0.963	0.957-0.963	0.926-0.937
Valor de Yodo	82-88	80-88	125-145
Valor Saponificación	179-185	177-182	185-188

Fuente: OGUNNIYI, D. Castor oil: A vital industrial raw material. En: Bioresource Technology. Junio, 2006, vol. 97, no. 9, p. 1086-1091.

1.2.2. Composición

Al igual que otros aceites de origen vegetal, el aceite de ricino es un triglicérido de diversos ácidos grasos y alrededor de 10% de glicerina. El ácido graso de mayor porcentaje presente en el aceite de ricino es el ácido ricinoleico, un ácido graso insaturado con una función hidroxilo en el carbono 12, al que se le atribuye la alta viscosidad del aceite²⁹. En la Tabla 3 se presenta la composición de los ácidos grasos del aceite de ricino.

²⁸ SÁNCHEZ MEDINA, Iris Adriana y HUERTAS GRECO, Karina. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de *Ricinus Communis* (Higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. Trabajo de Pregrado en Química Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de Química Industrial. Pereira, 2012.

²⁹ SCHOLZ, Volkhard and NOGUEIRA DA SILVA, Jadir. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. En: Biomass and Bioenergy. Febrero, 2008, vol. 32, no. 2, p. 95-100.

Tabla 3. Composiciones de ácidos grasos del aceite de ricino.

Ácido graso	Composición (%) según DIN	Composición (%) según BOCKISCH
Ácido Ricinoleico	86-92	82-90
Ácido Linoleico	2.8-6	3-6
Ácido Oleico	2.5-4	2-4
Ácido Palmítico	1-1.5	1-1.5
Ácido Esteárico	0.5-1.5	-
Ácido Linolenico	0.2-0.8	0.2-0.6

Fuente: SCHOLZ, Volkhard and NOGUEIRA DA SILVA, Jadir. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. En: Biomass and Bioenergy. Febrero, 2008, vol. 32, no. 2, p. 95-100.

1.2.3. Transesterificación del aceite de ricino

El proceso de transesterificación consiste en una reacción de un triglicérido, que bien puede ser un aceite o grasa, con un alcohol de bajo peso molecular en presencia de un catalizador ácido o básico con el fin de producir un éster y como subproducto, glicerol³⁰. Dicha mezcla de mono-alkil ésteres de ácidos grasos obtenida a partir de la reacción de transesterificación es llamada biodiesel y se considera un sustituto parcial o total del diesel³¹.

1.2.3.1. Catálisis Ácida

La transesterificación también puede ser catalizada por ácidos de Bronsted, los más usados son ácido sulfúrico y ácido sulfónico, pero las tasas de reacción son bajas y

³⁰ COHA VESGA, Pablo Miguel y ROJAS PUENTE, Laura Carolina. Obtención y caracterización de biodiesel por medio de la transesterificación en medio básico del aceite de higuera con diferentes alcoholes. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2009.

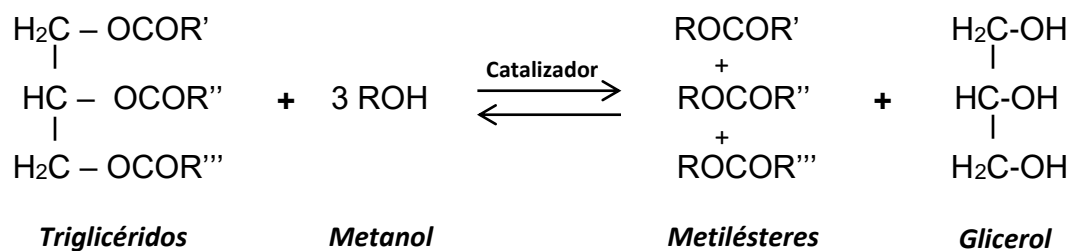
³¹ RAMIREZ GARCÍA, Yusney Andrea. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2016.

requieren temperaturas relativamente altas comparadas con la catálisis básica. Se utiliza generalmente como pretratamiento de los aceites cuando poseen un índice de acidez superior a 2 mg KOH/g tales como grasas y aceites de fritura³². La reacción de pre-esterificación ácida reduce significativamente la concentración de ácidos grasos libres convirtiéndolos en metilésteres, favoreciendo el rendimiento y mejorando la calidad del biodiesel producido³³.

1.2.3.2. Catálisis Básica

En la reacción de transesterificación alcalina, una mol de triglicéridos reacciona con tres moles de alcohol, comúnmente metanol o etanol, bajo la acción de un catalizador alcalino (KOH o NaOH son los más utilizados) para producir tres moles de alquilésteres y glicerina, que forman dos fases inmiscibles (Figura 3). Las variables principales que afectan el rendimiento, conversión y cinética de la reacción son: la calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el sistema catalítico, la temperatura y la agitación³².

Figura 3. Reacción general de transesterificación alcalina.



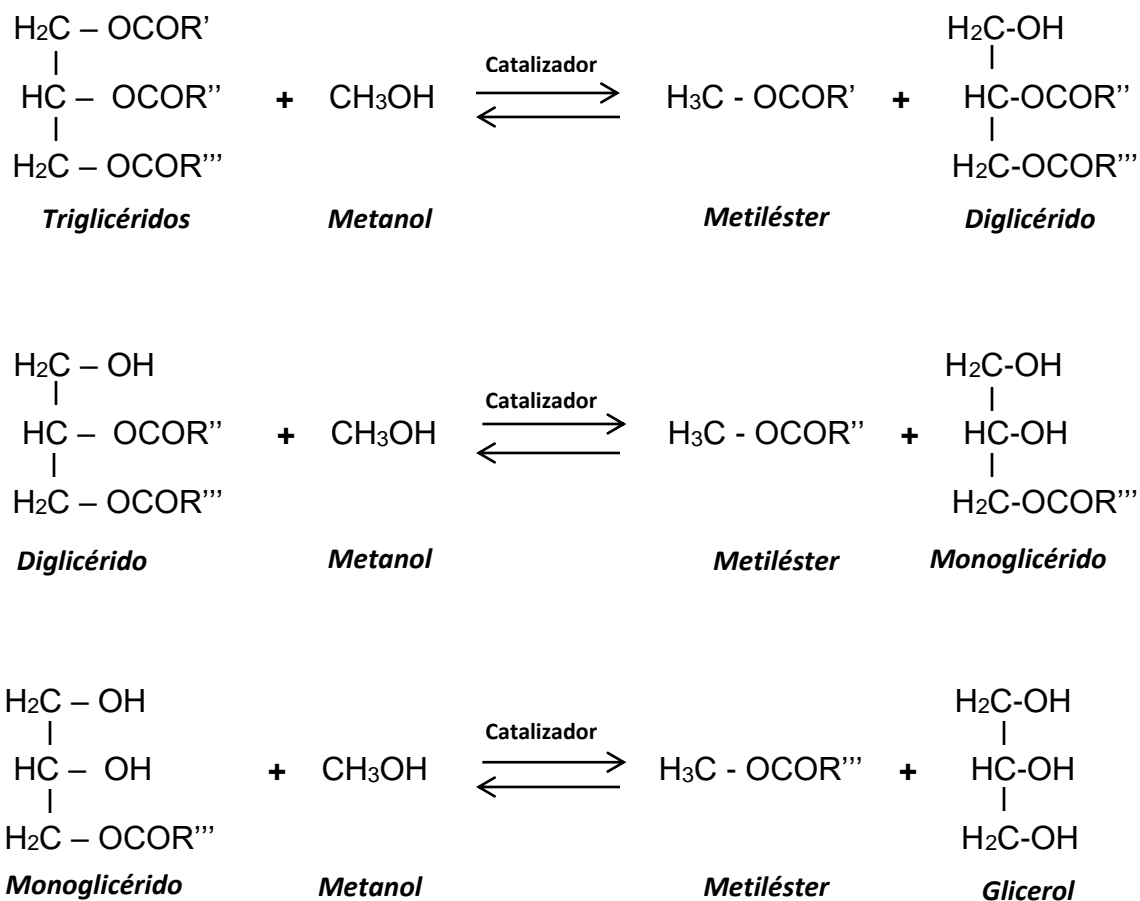
Fuente: COHA VESGA, Pablo Miguel y ROJAS PUENTE, Laura Carolina. Obtención y caracterización de biodiesel por medio de la transesterificación en medio básico del aceite de higuera con diferentes alcoholes. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Bucaramanga, 2009.

³² RAMIREZ, Y., *Op Cit.*

³³ AVELLANEDA VARGAS, Fredy Augusto. Producción y caracterización de biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso de Batch y un proceso continuo con un reactor Helicoidal. Tesis Doctoral en Ingeniería Químico, Ambiental y Procesos. Universitat Rovira I Virgili. Departamento de Ingeniería Química. Tarragona, 2010.

En la Figura 3 se presenta de manera general la reacción de transesterificación, no obstante ésta es una secuencia de tres reacciones consecutivas reversibles en la cuales se transforma los triglicéridos en diglicéridos, luego en monoglicéridos y finalmente en glicerol, produciendo una molécula de éster en cada paso por cada molécula de alcohol consumida³⁴ como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Etapas de reacción completa de transesterificación.



Fuente: RAMIREZ GARCÍA, Yusney Andrea. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Tesis de Pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2016.

³⁴ COHA, P. y ROJAS, L., *Op cit.*

1.3. ANTECEDENTES DEL USO DE ACEITES VEGETALES COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN

En los lodos base aceite la fase continua más utilizada en las formulaciones es el diesel. Sin embargo, debido a que posee un elevado contenido de aromáticos, este aceite desfavorece la regeneración de la capa vegetal y causa un impacto en el medio ambiente. Es por esta razón, que buscando disminuir ese impacto ambiental y sabiendo que los OBM son también formulados con ésteres, éteres o polialfaolefinas como fase continua, se han llevado a cabo ciertos estudios en los que se analiza el uso de aceites vegetales como sustitutos al diesel. En la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander han sido estudiados el aceite de palma, la glicerina, el biodiesel y biodiesel de soya. A su vez, en el ámbito internacional se han llevado a cabo diversas investigaciones con aceites vegetales como ajonjolí, coco, canola, entre otros, donde se analiza la viabilidad de utilizarlos en las formulaciones de lodos de perforación.

Los estudios realizados en la Universidad Industrial de Santander son:

- **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL ACEITE DE PALMA COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN EMULSIÓN INVERSA**

En este estudio realizado en el año 2002 por Acosta Gonzales Sergio y Rueda Vargas German, bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza León, el empleo del aceite de palma como fase continua en los lodos de perforación inversa resultó inviable dado que los lodos resultaron ser excesivamente viscosos y presentaron degradación posterior al sometimiento a altas temperaturas, esto debido a la naturaleza del aceite de palma crudo.

- **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DE LA GLICERINA COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN EMULSIÓN INVERSA**

Este proyecto fue realizado por Berna Arteaga Tatiana e Ilias Megarejo Ibis, bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza León en el año 2008.

Los resultados obtenidos fueron viscosidades excesivamente altas en las distintas formulaciones. Asimismo, se encontró que las pérdidas de filtrado estaban por encima del límite permitido independientemente de la cantidad y el controlador de filtrado empleado, con lo cual se concluyó la glicerina cruda, producto del proceso de transesterificación del aceite de palma, no era factible técnicamente para ser usada como fase continua en lodos de perforación tipo emulsión inversa.

- **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BIODIESEL COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN EMULSIÓN INVERSA**

Este trabajo investigativo fue llevado a cabo en el año 2010 por Benavides Ayala Fabio y Gómez Quintero Jimmy, bajo la dirección del docente Emiliano Ariza León.

En este estudio las viscosidades obtenidas con el biodiesel fueron mayores que las obtenidas con el diesel como fluido base. No obstante, las propiedades reológicas exhibidas por los lodos fueron favorables con lo cual los autores concluyeron que era factible el uso del biodiesel obtenido del aceite de palma como fase continua en lodos base aceite.

- **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN EMULSIÓN INVERSA**

Los autores Muñoz Hernández Oscar y Manrique Cárdenas Jorge, bajo la dirección del profesor Emiliano Ariza León, analizaron el uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos base aceite, en el año 2012.

El biodiesel de soya resultó factible técnicamente, dado que las viscosidades plásticas exhibidas fueron bajas, y las tortas mostraron buenas características, además las diferencias evidenciadas entre éste y el diesel para las distintas formulaciones no fueron significativas, exceptuando la de alto contenido de agua 40/60.

Desde el punto de vista económico, el uso del Biodiesel de Soya como fase continua en lodos base aceite resultó no ser factible, debido a que el costo por barril del fluido preparado con éste fue de 44% más alto que el preparado con diesel.

OTROS ESTUDIOS

En el año 2011, Vega, Rubén³⁵ estudió la factibilidad del uso de aceites naturales de Tártago (*Euphorbia Lathyris*), Palma aceitera (*Elaeis Guineensis*) y Soya (*Glycine Max*) en la preparación de fluidos de perforación base aceite. Para ello, obtuvo los ésteres de dichos aceites mediante transesterificación para luego preparar los lodos; dichos lodos exhibieron propiedades reológicas y físico-químicas similares a una formulación con aceite mineral Vassa tomada como referencia, además los fluidos preparados con los aceites naturales resultaron ser menos contaminantes que el preparado con el aceite mineral Vassa para las propiedades del suelo ya que permitieron el crecimiento de las semillas de pasto guinea.

Fadairo, Adesina, et al.³⁶, en el año 2012, estudiaron el uso de aceites de *Jatropha*, *Moringa*, *Algae* y *Canola* en lodos base aceite. Las propiedades reológicas de los lodos formulados con éstos fueron cercanas a las de un fluido base diesel elegido como fluido de control. Asimismo, los fluidos preparados exhibieron un comportamiento similar al modelo plástico de Bingham. Por otra parte, los resultados en la prueba de pérdida de filtrado estuvieron dentro de los límites

³⁵ VEGA, Rubén. Factibilidad de uso de los aceites naturales de tártago (*Euphorbia Lathyris*), Palma aceitera (*Elaeis Guineensis*) y Soya (*Glycine Max*) como fluidos de perforación base aceite. Universidad de Oriente Núcleo de Monagas. Maturín, 2011.

³⁶ FADAIRO, A., *Op cit.*

permisibles, siendo el OMB de canola el de menor valor seguido por el jatropha.

En el año 2013, Auta, Manase³⁷ determinó que el fluido de perforación formulado a partir de aceite de ricino extraído mecánicamente de las semillas de la planta, presentaba una viscosidad de embudo mayor a la de un fluido tomado como referencia. Sin embargo, de manera general las características exhibidas por la formulación con el aceite crudo de ricino fueron cercanas a las exhibidas por el fluido de referencia, tales como, estabilidad eléctrica, alcalinidad, HPHT, entre otras.

En el 2014, Ibrahim, Susan³⁸ sintetizó poliésteres a partir de una reacción de poliesterificación del aceite de ricino para utilizarlos en la formulación de lodos de perforación sintéticos. Encontró que, por la biodegradabilidad de los poliésteres obtenidos, los lodos preparados con éstos podrían ser amigables con el medio ambiente. A su vez, los lodos preparados con los poliésteres fueron comparados con un lodo base sintética de referencia, hallando que las propiedades reológicas de los lodos formulados con los poliésteres fueron superiores a las del fluido de referencia, pero dichos lodos presentaron buenos valores de estabilidad térmica.

En el año 2015, Agwu, Okorie, et al. ³⁹, investigaron el costo, propiedades y disponibilidad de diversos aceites vegetales para la formulación de lodos base aceite. En cuanto al aceite de ricino, encontraron que su punto de fluidez cumple con los requerimientos de los lodos base aceite, lo que permite su uso a bajas temperaturas si se compara con otros aceites vegetales, cuyos puntos de fluidez con más altos. No obstante, debido a su elevada viscosidad cinemática, al aplicarse crudo a los lodos base aceite podría resultar en excesivas viscosidades plásticas.

Analizando las investigaciones previas tanto en el ámbito nacional como

³⁷ AUTA, Manase. Extraction and Characterization of Drilling Fluid from Castor Oil. En: International Journal of Innovation and Applied Studies. Junio, 2013, vol. 3, no .2, p. 382-387.

³⁸ IBRAHIM, Susan. Esterification Reaction for Novel synthesis Castor-based Polyester and Formulation as Base Oil in Synthetic Drilling Fluid. En: International Journal of Science and Research (IJSR). Diciembre, 2014, vol. 3, no. 12, p. 1969-1975.

³⁹ AGWU, O.; ISEMIN, I. and AKPABIO, M., *Op Cit*.

internacional, de manera general se puede decir que los lodos formulados a partir aceites vegetales transesterificados (biodiesel), presentan características más cercanas a las exhibidas por el fluido de referencia elegido, en comparación con lodos preparados con los aceites crudos, esto se debe en parte a la naturaleza viscosa de éstos.

En la Universidad Industrial de Santander, los dos biodiesel estudiados (Palma y Soya) fueron adquiridos ya procesados. En el presente trabajo de investigación, se propone obtener el biodiesel del aceite de ricino mediante la realización de reacciones de transesterificación, y encontrar las condiciones más adecuadas para disminuir la viscosidad del aceite de ricino crudo, la cual es una de las propiedades fundamentales para su uso en los lodos de perforación.

2. METODOLOGÍA PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para la realización de la transesterificación del aceite de ricino, así como la descripción de la caracterización a realizarle a las muestras obtenidas, a partir de la cual se efectúa la selección de las condiciones de reacción para la obtención del aceite transesterificado de ricino a utilizar en la formulación de los lodos de emulsión inversa.

El desarrollo de esta etapa del proyecto fue llevado a cabo en el Laboratorio del grupo de investigación de Ingeniería Química INTERFASE ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

La materia prima de trabajo fue el aceite de ricino el cual fue adquirido en Laboratorios León S.A. con su respectiva ficha técnica (Anexo A). Al aceite se le midió el índice de acidez (miligramos de KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de muestra) y se calculó el porcentaje de ácidos libres (% AGL) siguiendo la norma UNE EN ISO 600 (Anexo B) con el fin de determinar si era necesaria la pre-esterificación de la materia prima. Asimismo, se le determinó la viscosidad a 40 °C (104 °F) por medio de un equipo BROOKFIELD DV-II+RHEOMETER.

2.2. PRUEBAS PRELIMINARES DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

Las pruebas preliminares de transesterificación alcalina se realizaron con el fin de observar el comportamiento de la materia prima frente a distintas condiciones de reacción, aspecto en el cual al realizar la revisión de publicaciones entre distintos autores se encontró que se presentaban discrepancias. Estas pruebas permitirán posteriormente establecer las variables y niveles de tratamiento a considerar en el diseño experimental. En dichas pruebas preliminares se varió el tipo de catalizador (KOH y NaOH), la relación molar alcohol: aceite, el porcentaje de catalizador, la temperatura y el tiempo de reacción. El alcohol utilizado fue el metanol. Los resultados de estas pruebas se encuentran descritos en el capítulo 4 sección 1 (4.1.2).

2.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN

Entre las diferentes variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite de ricino se encuentra el tipo de catalizador y su porcentaje (%p/p), la relación molar alcohol: aceite, tiempo de reacción, temperatura de reacción, entre otros.

Para esta parte del proyecto se eligió un diseño factorial de 2^2 con una réplica por cada análisis para un total de 8 experimentos. Los niveles inferior y superior para cada variable fueron elegidos basados en la revisión bibliográfica^{40,41,42,43,44} y los

⁴⁰ NAKARMI, Amita and JOSHI, Susan. A Study on Castor Oil and Its Conversion into Biodiesel by Transesterification Method. En: Nepal Journal of Science and Technology. Junio, 2014, vol. 15, no.1, p. 45-52.

⁴¹ MURAT, Kilic, *et al.* Optimization of biodiesel production from castor oil using factorial design. En: Fuel Processing Technology. Marzo, 2013, vol. 111, p. 105-110.

⁴² DEEP, A., SANDHU, S.S. and CHANDER, S. Optimization of Reaction Parameters of Transesterification for Castor Oil. En: Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR). Febrero, 2017, vol. 76, p. 115-118.

⁴³ DESHPANDE, D.P., *et al.* Transesterification of Castor Oil. En: ISCA Journal of Engineering Sciences. Julio, 2012, vol. 1, no. 1, p. 2-7.

⁴⁴ SOUSA, Louise; LUCENA, Izabelly and FERNANDES, Fabiano. Transesterification of castor oil: Effect of the acid value and neutralization of the oil with glycerol. En: Fuel Processing Technology. Febrero, 2010, vol. 91, no. 2, p. 194-196.

resultados de las pruebas preliminares. En la Tabla 4 se muestran las dos variables independientes elegidas, que fueron la relación molar alcohol (metanol): aceite (X1) y el porcentaje de catalizador (X2), y sus respectivos niveles. En la Tabla 5 se muestra la matriz de los ocho experimentos a realizar, donde el símbolo más (+) representa el nivel superior y el símbolo menos (-) el nivel inferior, para las dos variables X1 y X2 del diseño de experimentos.

Tabla 4. Diseño de experimentos transesterificación.

Variable	Nivel inferior (-)	Nivel superior (+)
X1:Relación molar alcohol:aceite	6:1	9:1
X2: % Catalizador	1,0	1,4

Tabla 5. Matriz de experimentos transesterificación.

Experimento	Variable	
	X1	X2
1	+	+
2	+	-
3	-	+
4	-	-
5	+	-
6	-	-
7	+	+
8	-	+

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas preliminares, así como la bibliografía consultada, para las reacciones del diseño de experimentos se decidió mantener constante:

- Tipo de catalizador: se eligió hidróxido de potasio (KOH).
- Tiempo de reacción: 60 minutos.
- Temperatura de reacción: 30 °C.

La respuesta a este diseño de experimentos se evalúa mediante la medición de la viscosidad al biodiesel obtenido, y el % FAME (porcentaje de metil ésteres de los

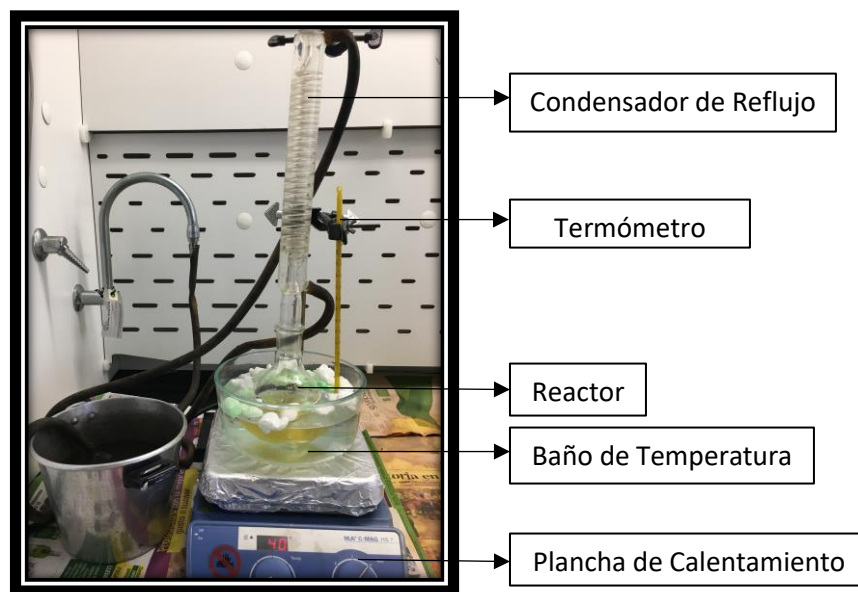
ácidos grasos) utilizando cromatografía de gases, tal como se describe en la sección 5 del presente capítulo (2.5).

2.4. MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO

El montaje experimental consistió de un reactor de 250 mL acoplado con un condensador de reflujo y una plancha de calentamiento sobre un baño maría a la temperatura de reacción y agitación constante de 500 rpm (Figura 5).

La plancha de calentamiento suministra energía al baño maría manteniendo la temperatura de reacción constante y uniforme en el reactor. Es muy importante asegurar que el nivel del agua en el baño de temperatura se encuentre por encima del nivel del aceite en el balón. Además, el reflujo evita la pérdida de metanol durante la reacción.

Figura 5. Montaje experimental de reacción de transesterificación.



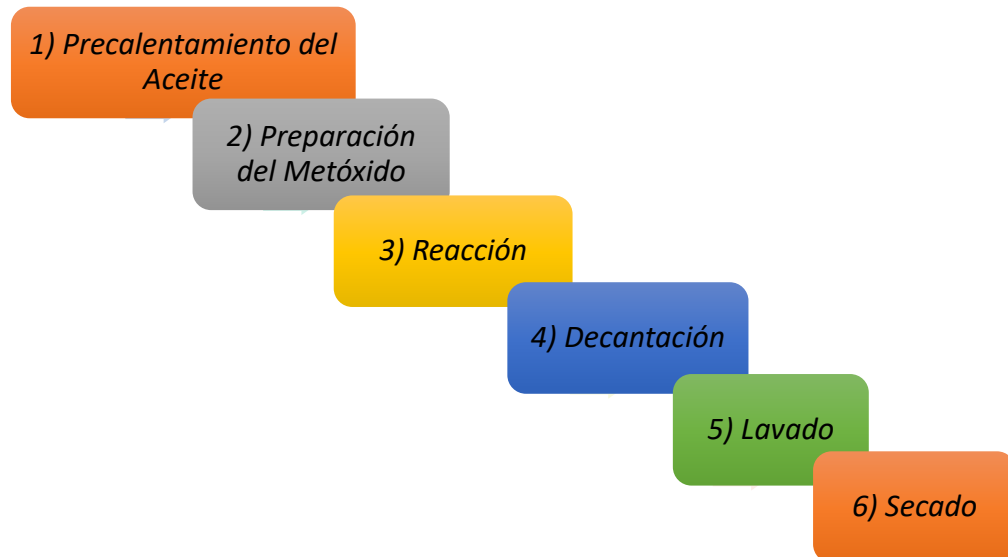
Fuente: Autores.

El procedimiento llevado a cabo para cada reacción fue:

- 1) Se pesaron aproximadamente 60 gramos de aceite de ricino crudo.
- 2) Se precalentó la muestra de aceite a una temperatura de 110 °C por una hora con el fin de evaporar el agua presente en la misma.
- 3) Paralelamente, se efectuaron los cálculos para la preparación del metóxido de acuerdo a lo estipulado en el diseño experimental. En un vaso de precipitado se vertió el metanol y se le adicionó el catalizador previamente pesado. Se agitó constantemente a temperatura ambiente hasta que la solución se homogenizó por completo.
- 4) Se agregó el metóxido al aceite crudo y se dejó reaccionar a una temperatura determinada con agitación constante por un tiempo estipulado de reacción de 60 minutos.
- 5) Una vez terminado el tiempo de reacción se procede a transferir la muestra a un embudo de decantación donde se dejó reposar por tres horas dado que después de transcurrido dicho tiempo, no se observó un aumento en el nivel de glicerina. La separación de fases se observó luego de 40 minutos de decantación.
- 6) Se realizó el lavado del biodiesel con agua acidulada (2 mL de H₃PO₄ al 10 %p/p por cada 1000 mL de agua destilada) y agua destilada hasta que la fase acuosa adquiriera un pH neutro.
- 7) Una vez finalizado el lavado, se llevó la muestra a la plancha de calentamiento y se dejó secar a una temperatura de 110 °C por una hora, esto con el fin de retirar el exceso de alcohol y agua de lavado.

En la Figura 6 se presenta un diagrama del anterior procedimiento.

Figura 6. Diagrama del procedimiento para la obtención de biodiesel a partir del aceite de ricino.



Fuente: Los autores

2.5. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO OBTENIDO

De acuerdo al peso del aceite transesterificado obtenido respecto al peso del aceite de ricino antes de la reacción se determinó el porcentaje de rendimiento.

Se determinó el contenido de metil ésteres de ácidos grasos según la norma EN14103 (Anexo C) mediante la utilización de un cromatógrafo de gases AGILENT TECHNOLOGIES 7890A con el 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, el inyector a una temperatura de 250°C, split ratio de 1:50, una presión de 24 psi, un flujo total de 22,04 mL/min y flujo de purga de 3 mL/min, el autoinyector con volumen de inyección de 1 µL y una columna DB-WAX de 30m x 0.250mm x 0.25µm. Cada muestra se inyectó dos veces, obteniendo así dos cromatogramas para cada

muestra de biodiesel, para un total de 16 cromatogramas. En el anexo D se presenta uno de los cromatogramas obtenidos.

Por otra parte, se midió la viscosidad de cada una de las muestras a 40 °C (104 °F) con un viscosímetro BROOKFIELD DV-II+RHEOMETER con el fin de identificar la reducción de viscosidad respecto al aceite de ricino crudo.

2.6. SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN

Dado que en este proyecto la principal finalidad de la realización de la reacción de transesterificación de aceite de ricino es la disminución de la viscosidad original de dicho aceite crudo (267,2 cP) para adecuarlo a su utilización en lodos de emulsión inversa, la selección de las mejores condiciones de reacción se realizó teniendo en cuenta la reducción de viscosidad así como el rendimiento y % FAME obtenido para cada experimento de la reacción de transesterificación alcalina.

Los resultados de estas reacciones de transesterificación se muestran en el capítulo 4 sección 1 (4.1.3).

3. FORMULACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA UTILIZANDO ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO

En este capítulo se describe la metodología experimental llevada a cabo para la preparación de las formulaciones de los lodos utilizando el aceite transesterificado de ricino obtenido, así como las pruebas preliminares realizadas a este aceite y las pruebas llevadas a cabo para las distintas formulaciones para su posterior análisis respecto a las formulaciones en base diesel.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Un diseño de experimentos consta de una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida⁴⁵.

Un diseño experimental tiene por objetivo:

- Determinar las variables que tienen mayor influencia en la variable de respuesta.
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables que contribuyan a reducir la variabilidad de la respuesta.
- Determinar el mejor valor de las variables controlables que influyen en la respuesta con el fin de obtener un valor cercano al deseado.

Los variables tipos de variables que comúnmente se distinguen en un diseño de experimentos se presentan a continuación.

⁴⁵ MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. 2, Limusa Wiley. México, 2004.

- Variable independiente: Es el factor o la causa que influye sobre la variable de salida o respuesta. Para determinar dicha influencia, el experimentador debe asignarle niveles diferentes y observar cómo se comporta la variable de respuesta en cada caso.
- Variable dependiente: Es la variable de salida o respuesta, la cual es medida para cada modificación en la variable independiente de manera que se pueda establecer la influencia de ésta en los resultados.
- Variable de bloqueo: Es una variable que es controlada de manera que no intervenga con la variable independiente en cuanto a los efectos en la variable de respuesta. Para esto, a esta variable de bloqueo se le asigna un valor constante.

3.1.1. Reconocimiento y formulación del problema

Usualmente los fluidos de perforación base aceite utilizan diesel como fase continua, pero este presenta riesgos asociados a la salud y el medio ambiente. Por esta razón el presente trabajo tiene como propósito fundamental, plantear una alternativa mediante el uso de aceite transesterificado de ricino como fase continua en dichos lodos.

Con base en lo anterior, el objetivo principal de este proyecto es establecer si es viable técnicamente el uso de aceite transesterificado de ricino como fase continua en lodos de perforación, comparando de las propiedades exhibidas por los lodos preparados con éste contra las exhibidas por los lodos base diesel.

3.1.2. Variables de operación

Dado que se manejará una única variable independiente, el diseño experimental a utilizar en esta parte del proyecto será un diseño unifactorial, cuyo factor será la relación aceite/agua manejado en tres niveles, y la variable de respuesta serán las propiedades reológicas y de filtrado para cada formulación de lodo las cuales serán analizadas en comparación con la misma formulación en base diesel.

En este proyecto las variables consideradas son:

- Variable independiente: Se considera la relación aceite transesterificado de ricino/agua como variable independiente que influirá en las propiedades del lodo. Los tres niveles a manejar elegidos fueron relaciones de 85/15, 80/20 y 75/25.
- Variables dependientes: Son las propiedades reológicas y de filtrado del lodo en cada formulación cuyo criterio de comparación son las propiedades exhibidas por la misma formulación en base diesel.
- Variables de bloqueo: Dado que los aditivos a utilizar están bien definidos para cada formulación, el efecto de éstos en las propiedades del lodo base aceite fue considerado como constante al utilizar la concentración recomendada por el fabricante. Asimismo, dado que las pruebas se realizarán a los mismos valores de presión (atmosférica para reología y 100 psi para filtrado) y temperatura (ambiente) estas variables también se consideran de bloqueo.

3.2. PRUEBAS PRELIMINARES AL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO

3.2.1. Caracterización del aceite transesterificado de ricino

La caracterización del aceite transesterificado de ricino y el diesel se llevó a cabo en el Laboratorio de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander con el fin de establecer si éste cumplía con los los parámetros necesarios para ser utilizado en un lodo base aceite los cuales fueron mencionados en el capítulo 1 sección 1 (1.1.4). Las pruebas realizadas fueron:

- Gravedad API: En la industria petrolera es muy común expresar la densidad relativa de un fluido o su gravedad específica en grados API, unidad creada por el *American Petroleum Institute* API siendo necesaria para la conversión de volúmenes medidos a cualquier temperatura⁴⁶. En el presente trabajo de grado se realizó dicha medición según la norma ASTM D 287 / API 2544 (ANEXO F).
- Punto de Relampagueo en Copa Abierta Cleveland: El punto de Relampagueo o Flash Point se define como la temperatura mínima requerida para causar una pequeña ignición en la película de vapores generada por el fluido en su superficie por acción de una llama, lo que permite determinar el nivel de inflamabilidad del mismo. Se determina según la norma ASTM D 92-90 (ANEXO G).
- Viscosidad Saybolt: La viscosidad es una medida de la resistencia interna al movimiento de un fluido que se debe a la fuerza de atracción entre sus moléculas. La viscosidad Saybolt es una medida exclusiva de la industria

⁴⁶ LEÓN PABÓN, John Alexander y TORRES LÓPEZ, Mario. Guía práctica de laboratorio de Fluidos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2013.

petrolera y su utilización ha sido restringida a los aceites lubricantes y a los crudos⁴⁷. Su medición se realizó a distintas temperaturas conforme a la norma ASTM D 88 (ANEXO H), y a partir de ésta se calculó la viscosidad cinemática.

- **Punto de fluidez:** Se define como la temperatura más baja a la cual el crudo fluye, es decir que a temperaturas menores al punto de fluidez, el fluido pierde su capacidad para moverse. En aceites que contienen ceras disueltas, éstas se separan y al enfriarse forman una red que atrapa al crudo en su interior, de tal forma que una vez se encuentra completa la estructura, el aceite no puede fluir. Por el contrario, si el aceite no posee ceras, el punto de fluidez está relacionado con la viscosidad, la cual aumenta progresivamente con la disminución de la temperatura hasta que el crudo pierde su capacidad para desplazarse⁴⁷. Su medición se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D-97 (ANEXO I).

3.2.2. Prueba de compatibilidad con los aditivos de los lodos de emulsión inversa

Esta prueba se realizó con los aditivos a utilizar para la preparación de las formulaciones de los lodos base aceite los cuales se exponen a continuación:

- **Viscosificante:** Es una arcilla organofílica que aporta viscosidad y propiedades de suspensión a los fluidos base aceite. Requiere un aditivo polar como el agua para desarrollar su máximo rendimiento. Este producto fue desarrollado para aumentar la capacidad de acarreo de los recortes en los lodos.
- **Emulsificante:** Es un ácido graso poliaminado que se encarga de formar la emulsión básica del agua en el aceite base, proporcionando estabilidad a ésta.

⁴⁷ LEÓN, J. y TORRES, M., *Op Cit.*

Mejora las características de humectación del aceite y como función secundaria contribuye a la disminución del filtrado HPHT.

- **Humectante:** Contribuye a mejorar las características de humectación por aceite de los sólidos de perforación y agente densificante, con lo cual ayuda con la dispersión de sólidos incorporados. Asimismo, es un aditivo complementario que mejora las propiedades de flujo y la estabilidad de la emulsión.

- **Controlador de filtrado:** Es un aditivo de gilsonita (asfalto) que se emplea como agente de control de filtrado en lodos base aceite.

- **Agente alcalinizante:** El hidróxido de Calcio Ca(OH)_2 se utiliza como fuente de alcalinidad.

- **Fuente de salinidad:** El Cloruro de Calcio CaCl_2 se usa para dar salinidad a la fase acuosa de lodo.

- **Densificante 1:** La barita se utiliza para incrementar la densidad del lodo, lo cual contribuye en el control de la presión de los fluidos de la formación previniendo posibles reventones.

- **Densificante 2:** El carbonato de Calcio se utiliza como material densificante, el cual es soluble en ácido, ayudando en el control de presiones subterráneas. Asimismo, también contribuye al control de la pérdida de filtrado.

Procedimiento⁴⁸:

- 1) En diferentes vasos se agregaron 100 mL de aceite transesterificado de ricino.

⁴⁸ BENAVIDES AYALA, Fabio Ernesto; QUINTERO GÓMEZ, Jimmy y ARIZA LEÓN, Emiliano. Estudio de factibilidad del uso del Biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. En: Revista Fuentes: El Reventón Energético. Enero-Junio, 2011, vol.9, no. 1, p. 57-64.

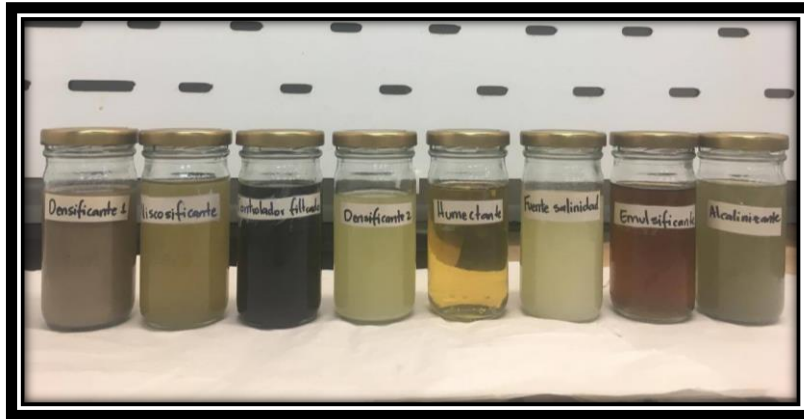
- 2) A cada uno se le adicionó la cantidad de aditivo correspondiente en proporción a la concentración suministrada por el fabricante (Tabla 6).
- 3) Se aplicó agitación a cada vaso y la mezcla de aceite transesterificado de ricino y aditivo se vertió en un frasco de vidrio rotulado.
- 4) Los frascos se dejaron en reposo por un periodo de 44 días realizando observaciones periódicas con el fin de observar alguna incompatibilidad. Se dice que un aditivo es incompatible cuando hay una reacción adversa entre el aceite y el aditivo resultando en la precipitación de sólidos, formación de gases, modificación en la viscosidad de la mezcla, entre otros.

Tabla 6. Cantidades de aditivos agregados al aceite transesterificado de ricino para prueba de compatibilidad.

Aditivo	Cantidad de aditivo (ppb)
Viscosificante	3
Emulsificante	2
Humectante	2
Controlador de filtrado	4
Alcalinizante	3
Fuente de salinidad	6,24
Densificante 1	100,7
Densificante 2	38

En la Figura 7 se muestran los recipientes con los aditivos agregados al aceite transesterificado de ricino al inicio de los 44 días de prueba.

Figura 7. Registro fotográfico de los recipientes de la prueba de compatibilidad al inicio del periodo de prueba.



Fuente: Los autores

3.2.3. Prueba de miscibilidad del aceite transesterificado de ricino con agua

El procedimiento descrito a continuación se realiza con el fin de establecer si existe miscibilidad entre el aceite transesterificado de ricino y el agua sin la presencia de un emulsificante, tomando como variables que afectan la miscibilidad las tensiones interfaciales, la temperatura y la agitación, las cuales al variarse permiten que dos fluidos desarrollen miscibilidad.

- 1) Se prepararon mezclas de aceite transesterificado de ricino con agua en diferentes proporciones 75/25, 50/50 y 25/75.
- 2) A cada mezcla se le aplicó agitación utilizando un agitador magnético a 600rpm durante 5 minutos.
- 3) Las mezclas fueron sometidas a calentamiento en una plancha hasta alcanzar una temperatura de 203 °F (95 °C).

- 4) Se registraron lecturas de % de agua libre, % de emulsión y % de aceite transesterificado de ricino para tiempos de 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 y 30 minutos.

Los resultados de las pruebas preliminares mencionadas anteriormente se presentan en el capítulo 4 sección 2.

3.3. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS

3.3.1. Formulaciones

Las formulaciones de lodos base aceite se prepararon con aceite transesterificado de ricino y diesel en cada caso. Las concentraciones de los aditivos a utilizar fueron suministradas por el fabricante. Cabe resaltar que la concentración de controlador de filtrado recomendada inicialmente era de 4 ppb; sin embargo, luego de realizar una prueba preliminar se observó que la cantidad de filtrado era excesiva por lo cual se decidió duplicar dicha cantidad (8ppb) para todas las formulaciones. Las formulaciones con las que se realizaron los lodos de perforación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Formulaciones lodos emulsión inversa.

Aditivo	Relación O/W: 85/15	Relación O/W: 80/20	Relación O/W: 75/25
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Aceite transesterificado de ricino (lodo base biodiesel de ricino)	Según O/W	Según O/W	Según O/W
Aceite diesel (lodo base diesel)	Según O/W	Según O/W	Según O/W
Agua	Según O/W	Según O/W	Según O/W
Fuente de salinidad (ppb)	6,24	6,24	6,24
Alcalinizante (ppb)	3	3	3
Viscosificante (ppb)	3	3	3
Controlador de filtrado (ppb)	8	8	8
Emulsificante (ppb)	2	2	2
Humectante (ppb)	2	2	2
Densificante 2 (ppb)	38	38	38
Densificante 1	Según requiera	Según requiera	Según requiera

3.3.3. Pruebas

Las pruebas a las distintas formulaciones de lodo utilizando aceite transesterificado de ricino y diesel se llevaron a cabo en el Laboratorio de Lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander.

3.3.2.1. Densidad⁴⁹

La densidad, comúnmente llamada peso del lodo, se mide con una balanza con un margen de error de 0,1 lb/galón, mediante el siguiente procedimiento:

⁴⁹ M-I & SWACO, *Op cit.*

- 1) Quitar la tapa y llenar completamente el vaso con el lodo a probar midiendo y registrando su temperatura.
- 2) Poner la tapa hasta que esté firmemente asentada, asegurándose que parte del lodo sea expulsado a través del agujero de la tapa.
- 3) Limpiar el lodo que está fuera del vaso y secar el vaso.
- 4) Colocar el brazo de la balanza sobre la base con el cuchillo descansando sobre el punto de apoyo.
- 5) Desplazar el caballero hasta que el nivel de la burbuja de aire indique que el brazo graduado está nivelado, para esto, la base de la balanza debe estar asentada sobre en una superficie uniforme.
- 6) En el borde del caballero más cercano al vaso, leer la densidad o peso del lodo.

3.3.2.2. Reología⁵⁰

Esta prueba se realiza con el fin de determinar las propiedades de viscosidad plástica (VP), viscosidad aparente (VA), punto cedente (YP) y resistencia gel.

El procedimiento llevado a cabo para la viscosidad plástica, punto cedente y viscosidad aparente es:

- 1) Colocar la muestra de lodo dentro del vaso térmico y sumergir el manguito del rotor hasta el nivel de la línea trazada.
- 2) Con el manguito girando a 600 RPM esperar que la indicación se haga constante y registrarla.
- 3) Cambiar la velocidad a 300 RPM y esperar que la indicación se estabilice y registrar la medida.
- 4) Calcular la viscosidad plástica VP (cP) como la indicación a 600 RPM menos la indicación a 300 RPM. Calcular el punto cedente YP (lb/100ft²) como la indicación

⁵⁰ M-I & SWACO, *Op cit.*

a 300 RPM menos la viscosidad plástica. La viscosidad aparente VA (cP) se calcula como la indicación a 600 RPM dividida por 2.

El procedimiento llevado a cabo para medir esfuerzo gel es:

- 1) Colocar la muestra del lodo de la manera anterior y agitar a 600 RPM por al menos 60 segundos.
- 2) Dejar reposar el lodo durante 10 segundos con el motor apagado e iniciar rotación a 3 RPM. La indicación máxima una vez iniciada la rotación a 3 RPM es el esfuerzo gel inicial (lb/100ft²).
- 3) Agitar la muestra de lodo una vez más por un mínimo de 60 segundos y dejar reposar por 10 minutos. Leer la indicación de la misma manera que la anterior y registrarla como esfuerzo gel a 10 minutos (lb/100ft²).

3.3.2.3. Filtrado API⁵¹

El objetivo de esta prueba es medir el volumen de filtrado y realizar el análisis de la torta o cake. La prueba de filtrado API se lleva a cabo en un equipo de filtro prensa a una presión de 100 psi y a temperatura ambiente. El volumen de filtrado se registra en mL perdidos en 30 minutos. En cuanto a la torta se analiza si es consistente o inconsistente, plástica o quebradiza, y el espesor en x/32 in.

⁵¹ M-I & SWACO, *Op cit.*

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la sección 1 de este capítulo se presentan los resultados del proceso de transesterificación llevado a cabo según la metodología planteada en el capítulo 2. En la sección 2 se exponen los resultados de la aplicación del aceite transesterificado de ricino, obtenido a partir de las condiciones de reacción seleccionadas, en los lodos de emulsión inversa según lo descrito en el capítulo 3. Esto incluye los resultados de las pruebas preliminares a dicho aceite, así como de las pruebas realizadas a las formulaciones de los lodos utilizando el aceite transesterificado de ricino los cuales son comparados con los obtenidos para las mismas formulaciones en base diesel.

4.1. RESULTADOS DE LA TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

A continuación se presentan los resultados y análisis de la fase de transesterificación del aceite de ricino, y la selección de las condiciones de reacción a partir de la cual se obtuvo el biodiesel a utilizar como fase continua en las formulaciones de lodos de perforación.

4.1.1. Caracterización del aceite de ricino

El aceite crudo de ricino utilizado como materia prima para la reacción de transesterificación exhibía un color amarillo traslucido y un olor característico de dicho aceite. A dicho aceite se le midió el índice de acidez 3 veces y se calculó el promedio, con lo que el %AGL (porcentaje de ácidos grasos libres) del aceite de ricino crudo obtenido fue de 1,42 %, el cual es menor 3 %, que es límite establecido por la norma técnica colombiana para la determinación del índice de acidez y la

acidez para grasas y aceites vegetales y animales NTC 218, razón por lo cual no fue necesaria la pre-esterificación de dicho aceite. Esto permite deducir que la materia prima es de buena calidad debido a su bajo contenido de ácidos grasos libres, lo cual se traducirá en un ahorro de insumos y una optimización del tiempo de producción que beneficiará el rendimiento y la calidad del biodiesel que se obtendrá a partir de este aceite.

La viscosidad a 40 °C (104 °F) del aceite de ricino crudo fue de 267,2 cP, la cual es alta si se compara con la viscosidad de otros aceites vegetales a dicha temperatura, tales como aceite de palma (43,73 cP), soya (56,12 cP), oliva (39,74 cP), girasol (53,36 cP), coco (27,53c P)⁵², entre otros. Lo anterior es debido a que el principal constituyente del aceite de ricino es el ácido ricinoleico que posee un grupo hidroxilo en el carbono 12, y dado que los grupos hidroxilos forman enlaces de hidrógeno, la viscosidad de éste aceite es mayor que la de otros aceites vegetales⁵³.

4.1.2. Pruebas preliminares de transesterificación del aceite de ricino

Las primeras pruebas preliminares (P1, P2,...) de transesterificación alcalina se llevaron a cabo utilizando metanol como alcohol y NaOH (0,5 %p/p) como catalizador debido a que era el más utilizado y recomendado por otros autores, variando la relación molar alcohol: aceite (RMA), la temperatura y el tiempo de reacción como se muestra en la Tabla 8, esto basado en la previa revisión bibliográfica^{54,55,56,57}.

⁵² AGWU, O.; ISEMIN, I. and AKPABIO, M., *Op Cit.*

⁵³ SCHOLZ, V. and NOGUEIRA, J., *Op cit.*

⁵⁴ DEEP, A., SANDHU, S.S. and CHANDER, S., *Op cit.*

⁵⁵ DESHPANDE, D.P., *et al.*, *Op cit.*

⁵⁶ SOUSA, L., LUCENA, I. and FERNANDES, F., *Op cit.*

⁵⁷ MURAT, K., *et al.*, *Op cit.*

Tabla 8. Pruebas preliminares con NaOH.

Experimento	Catalizador	% Catalizador	RMA	T (°C)	t reacción (min)	Observación
P1	NaOH	0,5	12:1	50	90	Gelificó
P2	NaOH	0,5	12:1	35	90	Gelificó
P3	NaOH	0,5	7:1	50	60	Gelificó
P4	NaOH	0,5	7:1	35	60	Gelificó
P5	NaOH	0,5	9:1	35	90	Gelificó
P6	NaOH	0,5	12:1	35	90	Gelificó

Ninguna de las reacciones llevadas a cabo con NaOH evidenció separación de fases; además como se observa en la Tabla 8, todas las muestras obtenidas en dichas reacciones se gelificaron. Dicha gelificación ocurrió progresivamente a medida que disminuía la temperatura, esto pudo deberse a la saponificación del biodiesel y su posterior solidificación a temperatura ambiente, lo cual se puede presentar ante la posible conversión de los ácidos grasos, en este caso del ácido ricinoleico, en una sal sódica conocida como ricinoleato de sodio^{58,59}. Por lo anterior, se procedió probar otro catalizador (KOH). Para ello se realizaron 2 pruebas (P7 y P8), una con NaOH y otra KOH, a las mismas condiciones de porcentaje de catalizador (1,0%p/p), relación molar alcohol (metanol): aceite 9:1 y temperatura (35 °C) con el fin establecer si el segundo tipo de catalizador no presentaba dicho problema de formación de geles (Tabla 9). Por otra parte, debido a que no se observó diferencia alguna en los resultados y dado que los autores mencionados anteriormente encontraron que para tiempos mayores a una hora de reacción el porcentaje de FAME permanecía igual, esto es porque a dicho tiempo ya ha ocurrido reacción completa, se decidió establecer el tiempo de reacción en 60 minutos.

⁵⁸ DEEP, A., SANDHU, S. and CHANDER, S., *Op cit*.

⁵⁹ DUNN, Kevin. *Scientific Soapmaking: The chemistry of the Cold Process*. Clavícula Press, 2010.

Tabla 9. Pruebas preliminares NaOH Y KOH.

Experimento	Catalizador	% Catalizador	RMA	T (°C)	t reacción (min)	Observación
P7	NaOH	1	9:1	35	60	Gelificó
P8	KOH	1	9:1	35	60	No gelificó

Como se evidencia en la Tabla 9, debido a que con KOH la muestra no se gelificó se decidió seleccionar éste como el tipo de catalizador a utilizar. Asimismo, dado que las temperaturas a las cuales se realizaron todas las pruebas preliminares anteriores no se observó la separación de las fases biodiesel y glicerina, productos de la reacción de transesterificación, se decidió llevar a cabo 2 pruebas más variando la temperatura como se expone en la Tabla 10.

Tabla 10. Pruebas con KOH variando la temperatura.

Experimento	Catalizador	% Catalizador	RMA	T (°C)	t reacción (min)	Observación
P9	KOH	1	9:1	35	60	No separó
P10	KOH	1	9:1	30	60	Separó

Como se observa en la Tabla 10, con una temperatura de 30 °C sí se obtuvo la separación de fases; por tanto, basados en este resultado y en otros estudios donde los mejores resultados se alcanzaron a temperaturas menores o iguales a 30 °C^{60,61,62}, se decidió dejar esta variable constante en el diseño de experimentos, tomando 30 °C como la temperatura de reacción. Como se observa en los resultados, las temperaturas elevadas dificultan la separación de fases para la

⁶⁰ DESHPANDE, D.P., *et al.*, *Op Cit.*

⁶¹ DEEP, A., SANDHU, S. and CHANDER, S., *Op cit.*

⁶² SOUSA, L., LUCENA, I. and FERNANDES, F., *Op Cit.*

materia prima estudiada. Asimismo, una baja temperatura resulta beneficioso ya que se evita la pérdida de alcohol por evaporación y se disminuyen los costos relacionados con la energía térmica requerida para llevar el proceso de transesterificación.

4.1.3. Análisis y selección de las condiciones de reacción

Según lo descrito en el capítulo 2 secciones 5 y 6 (2.5 y 2.6), a cada una de las muestras obtenidas los experimentos se les calculó el rendimiento de la reacción (Rend.), el porcentaje de metil ésteres (% FAME) y se les midió viscosidad a 40 °C (104 °F) dado que esta es la temperatura establecida por la norma para biodiesel NTC 5444. En la Tabla 11 se muestran los resultados. Cabe mencionar que los experimentos (Exp.) se presentan agrupados según las condiciones de reacción, es decir los experimentos 7, 5, 8 y 6 son las réplicas de los experimentos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 11. Resultados de las reacciones de transesterificación del aceite de ricino.

Exp.	RMA	Catalizador (% p/p)	Rend. (%)	Rend. Promedio (%)	FAME (%)	FAME Promedio (%)	Viscosidad (cP)	Viscosidad Promedio (cP)
1 7	9:1	1,4	83,92 81,25	82,59	86,50 81,38	83,94	16,16 16,48	16,32
2 5	9:1	1	84,62 86,58	85,60	90,68 86,72	88,70	16,96 15,84	16,4
3 8	6:1	1,4	86,67 85,94	86,31	86,83 84,10	85,46	15,2 14,4	14,8
4 6	6:1	1	85,81 86,39	86,10	88,25 86,69	87,47	15,84 15,84	15,84

Como se puede observar en la Tabla 11, los valores del rendimiento de la reacción estuvieron en un rango de 84,6 a 86,7%, a excepción de los experimentos 1 y 7, los cuales se llevaron a cabo con los dos niveles superiores para ambas variables (RMA de 9:1 y %Catalizador de 1,4). Lo anterior concuerda con el % de FAME obtenido para estos experimentos cuyos valores fueron los menores, lo cual permite concluir que estas condiciones no son las más favorables. Por otro lado el punto de RMA 6:1 y 1,4 %p/p de catalizador (experimentos 3 y 8) arrojan los mayores rendimientos, pero estos valores no son muy lejanos del punto de RMA 6:1 y 1 %p/p de Catalizador (experimentos 4 y 6). De manera general se puede decir que a mayor relación molar el rendimiento de la reacción disminuye. Asimismo, cabe resaltar que el porcentaje de rendimiento se ve afectado por las pérdidas que ocurren en la etapa de separación y lavado, así como en los momentos donde el aceite se traspasa de un recipiente a otro.

En cuanto al porcentaje de FAME por punto de tratamiento estuvieron en un rango de 83,9 a 88,7%. Los mayores valores se obtuvieron para 1 %p/p de catalizador lo cual concuerda con lo obtenido por Nakarmi⁶³. Sin embargo no se observa una relación directa con la relación molar alcohol: aceite. Según el estudio realizado por Mardhiana⁶⁴ para relaciones molares mayores de 6:1 el % de FAME disminuye debido a que aumenta la solubilidad de los subproductos y se inicia una reacción reversible lo que reduce la cantidad de metil ésteres producidos dificultando la separación de fases. No obstante, la reacción produce resultados diferentes dependiendo de la fuente de la materia prima así como las condiciones a las cuales ésta se encuentra⁶⁴.

Es notorio que la reducción de viscosidad respecto al valor del aceite crudo de ricino (267,2 cP) es bastante considerable. Los valores de viscosidad obtenidos para todos los experimentos están en un corto rango de 14,4 a 16,9 cP, valores cercanos

⁶³ NAKARMI, A. and JOSHI, S., *Op Cit.*

⁶⁴ MARDHIANA BINTI, Ismail; GHAZI FAISAL, Najmuldeen and WAN MOHD HAFIZUDDIN, Wan Yussof. Exploring the Transesterification of Castor Oil to Produce Second Generation Biodiesel using a Novel Catalyst. En: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Enero, 2015, vol. 4, no.1, p. 289-293.

a los reportados en otros estudios^{65,66,67,68}; en dichos estudios el porcentaje de FAME estuvo entre 90 y 96% los cuales son mayores que los obtenidos en este trabajo, sin embargo las viscosidades fueron similares. Como se observa en la Tabla 11, la menor viscosidad se obtuvo en los experimentos 3 y 8 para un promedio de 14,8 cP en dicho punto (RMA de 6:1 y 1,4 %p/p de catalizador), seguida de los experimentos 4 y 6 con un promedio de 15,84 cP en el punto RMA 6:1 y 1 %p/p de catalizador. Esto concuerda con los porcentajes de rendimiento, los cuales fueron mayores en dichos dos puntos.

Teniendo en cuenta que los valores de viscosidad obtenidos no varían significativamente, y dado que entre los dos puntos que exhibieron menor viscosidad, RMA 6:1-1,4 %p/p de KOH y RMA de 6:1-1 %p/p de KOH, este último representa un ahorro en reactivos lo que conlleva a una disminución significativa en costos para la producción de grandes volúmenes si se considera un proceso a escala industrial, se decidió elegir el punto de RMA de 6:1 y 1 %p/p de KOH para producir el biodiesel de ricino a utilizar en los lodos de perforación.

Así pues, las condiciones seleccionadas para producir el aceite transesterificado de ricino a ser empleado en los lodos de emulsión inversa fueron:

- Temperatura de reacción: 30 °C
- Tiempo de reacción: 60 minutos
- Relación molar alcohol:aceite: 6:1
- % p/p de KOH: 1 %p/p

⁶⁵ BERMAN, Paula; NIZRI, Shahr and WIESMAN, Zeev. Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. En: Biomass and Bioenergy. Julio, 2011, vol. 35, no. 7, p. 2861-2866.

⁶⁶ MENEGHETTI PLENTZ, Simoni, *et al.* Biodiesel from Castor Oil: A comparison of Ethanolysis versus Methanolysis. En: Energy & Fuels. Julio, 2006, vol. 20, no. 5, p. 2262-2265.

⁶⁷ DEEP, A., SANDHU, S.S. and CHANDER, S., *Op Cit.*

⁶⁸ DESHPANDE, D.P., *et al.*, *Op Cit.*

El índice de acidez obtenido con estas condiciones de reacción fue de 0,31 mg KOH/g lo cual cumple con las normas NTC 5444 y EN 14214, normativas de biodiesel, que establecen un número ácido máximo de 0,5 mgKOH/g. Esto permite intuir que este biodiesel no se degradará rápidamente lo cual es beneficioso si se pretende almacenar por un tiempo prolongado.

4.2. APLICACIÓN DEL ACEITE TRANSESTERIFICADO DE RICINO EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN

En esta sección se presentan los resultados y respectivo análisis de la aplicación del aceite transesterificado de ricino en los lodos de perforación. Esto incluye los resultados de las pruebas preliminares de caracterización, compatibilidad y miscibilidad, así como los resultados de las pruebas de reología y filtrado realizadas a las formulaciones de los lodos utilizando el aceite transesterificado de ricino los cuales son comparados con los obtenidos para las mismas formulaciones en base diesel.

4.2.1. Caracterización del aceite transesterificado de ricino

Para cada prueba mencionada en el capítulo 3 sección 2 (3.2.1), se realizaron dos mediciones y los resultados presentados son el promedio de éstas. En las Tablas 12 y 13 se muestran los resultados.

Tabla 12. Resultados caracterización del biodiesel de ricino a utilizar en las formulaciones de lodos de emulsión inversa.

Propiedad	Diesel	Aceite transesterificado de ricino
Gravedad API 60/60 °F	31,9 °API	20,5 °API
Densidad 60 °F	0,832 g/cm ³	0,930 g/cm ³
Punto de inflamación °F	209,9	319,9
Punto de fluidez °F	< 14	< 14

En la Tabla 12 se observa que la densidad del aceite transesterificado de ricino es mayor que la del diesel en un 11,8 %. Lo anterior se ve justificado en los valores obtenidos de viscosidad cinemática a bajas temperaturas (77 °F y 100 °F) cuya diferencia también es notoria (Tabla 13).

Por otra parte el punto de inflamación del aceite transesterificado de ricino cumple con el requisito para ser utilizado en lodos ya que es superior a 180 °F, además es mayor que el del diesel por lo cual es más seguro que éste en cuanto al riesgo de incendio.

En cuanto al punto de fluidez tanto el aceite transesterificado de ricino como el diesel presentan un punto bastante bajo, lo cual es lo deseado para su utilización en ambientes con temperaturas muy bajas.

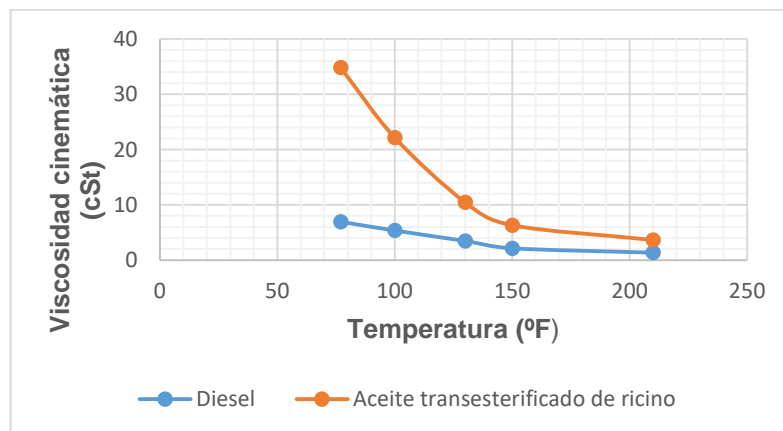
Asimismo, el aceite transesterificado de ricino no es tóxico al provenir de un aceite vegetal, lo cual podría ser benéfico desde el punto de vista ambiental.

Tabla 13. Viscosidad cinemática del aceite transesterificado de ricino y diesel a distintas temperaturas.

Temperatura (°F)	Viscosidad del Diesel (cSt)	Viscosidad del aceite transesterificado de ricino (cSt)
77	6,94	34,81
100	5,35	22,16
130	3,46	10,45
150	2,14	6,31
210	1,34	3,64

Como se expresa en la Tabla 13 y la Figura 8, los valores de viscosidad cinemática del aceite transesterificado de ricino, a las bajas temperaturas de medición, son mucho mayores que los del diesel. Lo anterior se debe a la naturaleza del aceite de ricino crudo que está compuesto en su mayoría por ácido ricinoleico a quien se le atribuye la alta viscosidad del aceite, y por ende, el biodiesel producido a partir del mismo compartirá dicha característica. No obstante, al aumentar la temperatura, los valores de viscosidad cinemática del aceite transesterificado de ricino disminuyen considerablemente acortando la diferencia con los valores para el diesel.

Figura 8. Variación de la viscosidad cinemática del diesel y del aceite transesterificado de ricino a distintas temperaturas.



Según los resultados de la caracterización, el aceite transesterificado de ricino cumple con las propiedades recomendadas para los aceites a ser utilizados en fluidos de perforación las cuales fueron presentadas en el capítulo 1 sección 1 (1.1.4.1).

4.2.2. Prueba de compatibilidad

En la Tabla 14 se presentan los resultados de la prueba de compatibilidad del aceite transesterificado de ricino con cada uno de los aditivos de los lodos de perforación al cabo de los 44 días de prueba. El procedimiento para esta prueba fue explicado en capítulo 3 sección 2 (3.2.2). Como se observa en la Figura 9, la cual fue el registro fotográfico tomado al final del periodo de prueba, no hubo reacción adversa entre los aditivos y el aceite, por lo cual el aceite transesterificado de ricino es compatible con todos los aditivos a utilizar en las distintas formulaciones.

Tabla 14. Resultado prueba de compatibilidad con cada uno de los aditivos.

Aditivo	Resultado
Viscosificante	Compatible
Emulsificante	Compatible
Humectante	Compatible
Controlador de filtrado	Compatible
Alcalinizante	Compatible
Fuente de salinidad	Compatible
Densificante 1	Compatible
Densificante 2	Compatible

Figura 9. Registro fotográfico de los recipientes de la prueba de compatibilidad al final del periodo de prueba.



Fuente: Los autores

4.2.3. Prueba de miscibilidad del aceite transesterificado de ricino con agua

Los resultados de la prueba de miscibilidad (Tablas 15, 16 y 17), cuyo procedimiento fue explicado en capítulo 3 sección 2 (3.2.3), evidencian que la miscibilidad de los fluidos aumenta de manera proporcional a la relación aceite/agua. Así pues, como se observa en la Tabla 15 en la mezcla cuya relación aceite/agua es de 75/25 no se observa la separación de la fase acuosa en el tiempo lo cual permite deducir que dicha fase se mantiene emulsionada en el aceite, a pesar de que el porcentaje de éste en la emulsión disminuye.

Tabla 15. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 75/25.

Mezcla	75% aceite transesterificado de ricino/ 25% agua		
Tiempo (min)	% agua	% emulsión	% aceite transesterificado de ricino
1	0	100	0
2,5	0	80	20
5	0	78	22
7,5	0	77	23
10	0	75	25
15	0	70	30
20	0	70	30
30	0	70	30

Tabla 16. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 50/50.

Mezcla		50% aceite transesterificado de ricino/ 50% agua	
Tiempo (min)	% agua	% emulsión	% aceite transesterificado de ricino
1	0	100	0
2,5	25	75	0
5	30	69	1
7,5	32	67	1
10	32	67	1
15	35	62	3
20	35	62	3
30	35	60	5

Para la mezcla 50/50 aceite/agua (Tabla 16), se observa que la fase acuosa tiende a dejar la emulsión a medida que pasa el tiempo dado que las gotas no se mantienen dispersas en el aceite, esto permite inducir que si se pretende preparar un lodo con dicha relación aceite/agua se requeriría agregar mucho más emulsificante que para la mezcla anterior con el fin de estabilizar la emulsión.

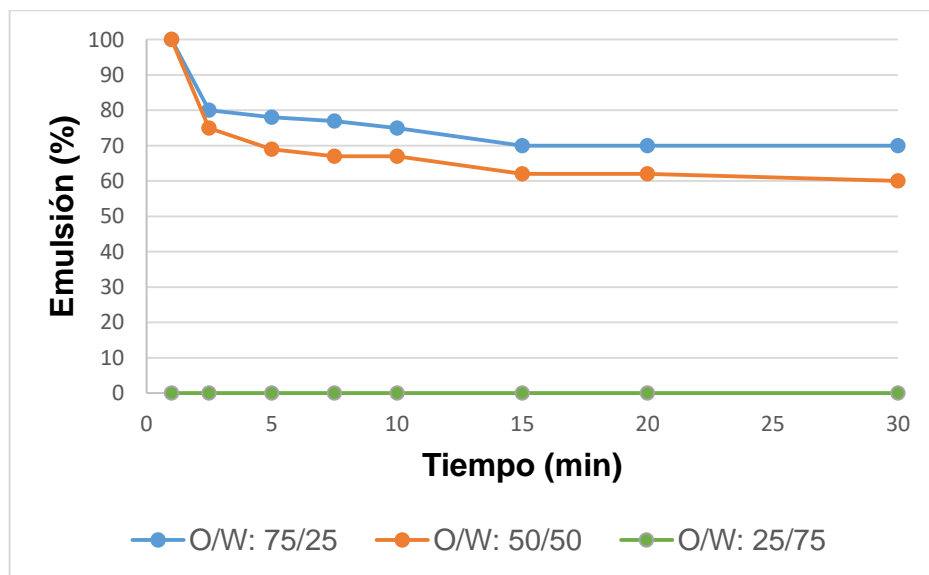
Tabla 17. Prueba de miscibilidad relación aceite/agua: 25/75.

Mezcla		25% aceite transesterificado de ricino/ 75% agua	
Tiempo (min)	% agua	% emulsión	% aceite transesterificado de ricino
1	75	0	25
2,5	75	0	25
5	75	0	25
7,5	75	0	25
10	75	0	25
15	75	0	25
20	75	0	25
30	75	0	25

Para la mezcla con mayor contenido de agua, relación aceite/agua 25/75 (Tabla 17), no se desarrolla emulsión, y las fases se mantienen en las mismas proporciones a lo largo del tiempo.

La Figura 10 muestra el comportamiento de la emulsión con respecto al tiempo para cada relación aceite/agua. Se puede concluir que a menor porcentaje de aceite en la mezcla, la emulsión se rompe de manera más rápida, como ocurre con la mezcla de 25 % aceite / 75 % agua donde la emulsión se separa por completo inmediatamente se suspende la agitación, sin embargo, para las relaciones O/W 50/50 y 75/25, se evidencia emulsión aún transcurridos 30 minutos, en porcentajes de 60 % y 70 % respectivamente siendo ésta última la más estable.

Figura 10. Porcentaje de emulsión contra tiempo.



Dado que para las formulaciones a preparar en este estudio la menor relación aceite/agua es de 75/25 (las otras relaciones a considerar son 80/20 y 85/15), se puede decir que no se requiere una alta concentración de emulsificante para estabilizar la emulsión inversa del lodo de perforación, lo cual es favorable desde el punto de vista económico.

4.2.4. Resultados de las formulaciones de los lodos

A continuación se exponen y analizan los resultados de las pruebas de reología y de filtrado para las distintas formulaciones estudiadas en el presente trabajo.

4.2.4.1. Relación O/W 85/15

En la Tabla 18 se presentan las propiedades medidas para el lodo de relación aceite/agua 85/15 tanto para el lodo base aceite transesterificado de ricino como para el base diesel.

Tabla 18. Resultados Formulación O/W 85/15.

Variable	Unidades	Aceite transesterificado de ricino	Diesel
θ600	lb/100ft2	109	55
θ300	lb/100ft2	60	30
θ200	lb/100ft2	44	22
θ100	lb/100ft2	24	13
θ6	lb/100ft2	5	4
θ3	lb/100ft2	4	3
Resistencia Gel 10''/ 10'	lb/100ft2	5/6	4/5
VP	cP	49	25
VA	cP	54,5	27,5
YP	lb/100ft2	11	5
Filtrado API	ml	9,2	3
Densidad	ppg	10,02	10
Cake		consistente	consistente
		plástica	plástica
		<1/32''	<1/32''

Como se observa en la Tabla 18 los esfuerzos de corte exhibidos por el lodo preparado con aceite transesterificado de ricino son más altos que los del lodo base diesel, sin embargo la diferencia entre los valores se hace menor a medida que la velocidad de corte disminuye, con lo cual se deduce que a velocidades de corte bajas el lodo de emulsión inversa base biodiesel de ricino exhibe un comportamiento similar al base diesel. Asimismo, los esfuerzos gel son similares para los lodos de ambos aceites por lo que el lodo base biodiesel de ricino permite una suspensión de recortes semejante a la brindada por el base diesel bajo condiciones estáticas, evitando con ello que dichos recortes se sedimenten causando pegadas de tubería o pérdidas de circulación. De igual forma, dado que no hay una gran diferencia entre los valores a 10 segundos y 10 minutos para ninguno de los dos fluidos, se puede concluir que no son lodos progresivos situación que es indeseable.

Las viscosidades plástica (VP) y aparente (VA) para la formulación con aceite transesterificado de ricino resultaron mayores a las obtenidas para el lodo base diesel. Lo anterior se debe a que la viscosidad de primer aceite es mucho mayor que la del segundo. No obstante, esto puede contribuir a la limpieza del hoyo y el mejoramiento de la capacidad de suspensión. Se sugiere que la viscosidad del fluido no sea mayor a la necesaria para la limpieza del hoyo, ya que al ir aumentando la concentración de sólidos de perforación, la viscosidad tiende a elevarse y si ésta es muy alta sería más difícil alcanzar altas tasas de penetración, además podría conducir a la necesidad de un aumento en la potencia requerida para la circulación⁶⁹; sin embargo las viscosidades del lodo base biodiesel de ricino no son excesivamente altas como para presentar dichos problemas. En cuanto al punto de cedencia, para el lodo base diesel es aproximadamente la mitad del obtenido para el base biodiesel de ricino, por cual el lodo preparado con aceite transesterificado de ricino presenta una mayor resistencia al flujo inicial que el base diesel, pero dado

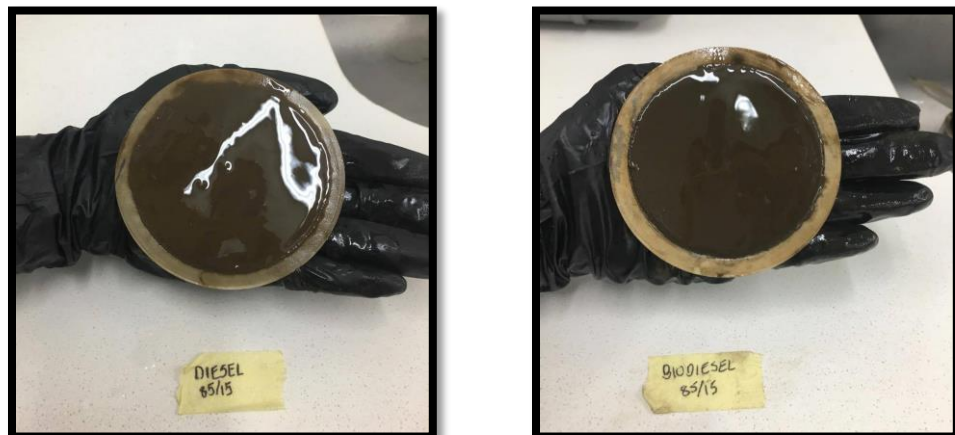
⁶⁹ BAROID, *Op cit.*

que un alto punto de cedencia favorece el acarreo de los recortes bajo condiciones dinámicas, esto podría ser conveniente para la operación de perforación.

El lodo base biodiesel de ricino presenta pérdidas de filtrado de 9,2 mL, las cuales se encuentran por fuera del rango deseable (<7 mL), mientras que el filtrado API del lodo base diesel fue considerablemente menor y dentro del rango permisible (3 mL). El filtrado fue 100% aceite para ambos lodos lo cual es un indicativo que la fase acuosa se encuentra bien emulsionada en la fase oleosa, es decir, la emulsión agua en aceite es estable. A su vez, como se evidencia en la Figura 11 en la que se presentan las tortas obtenidas para ambos lodos, éstas exhibieron excelentes propiedades de consistencia, plasticidad y espesor, con lo cual los dos fluidos estabilizan y contribuyen a sostener las paredes de la formación.

La densidad fue de 10 ppg para ambos fluidos dado que fue ajustada con barita en ambos casos. No obstante, cabe resaltar que la cantidad de dicho aditivo agregada al lodo base diesel fue mucho mayor que para el lodo base aceite transesterificado de ricino en todas las formulaciones del presente trabajo, debido a que este último presenta una densidad mayor en un 11,8 % que el diesel como se encontró en las pruebas de caracterización (4.2.1.)

Figura 11. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 85/15.



En la Tabla 19 se presenta la reología para la formulación de O/W: 85/15 tanto para el lodo base aceite transesterificado de ricino como para el base diesel, y en las Figuras 12 y 13 se presenta el comportamiento reológico para ambos fluidos. La viscosidad efectiva fue calculada utilizando la siguiente fórmula⁷⁰:

$$\mu_{Efec} = \frac{300 * (\theta x)}{\omega} \text{ (cP)}$$

Donde:

- θx : Indicación del viscosímetro a determinada RPM.
- ω : RPM del viscosímetro.

Tabla 19. Reología Formulación O/W 85/15.

RPM	V (1/s)	Aceite transesterificado de ricino		Diesel		Desviación estándar para μ_{Efec}	Coeficiente de variación (%)
		Esf. De corte (lb/100ft ²)	μ_{Efec} (cP)	Esf. de corte (lb/100ft ²)	μ_{Efec} (cP)		
0600	1020	109	54,5	55	27,5	13,5	32,93
0300	510	60	60	30	30	15	33,33
0200	340	44	66	22	33	16,5	33,33
0100	170	24	72	13	39	16,5	29,73
06	10,2	5	250	4	200	25	11,11
03	5,1	4	400	3	300	50	14,29

⁷⁰ M-I & SWACO, *Op cit.*

Figura 12. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 85/15.

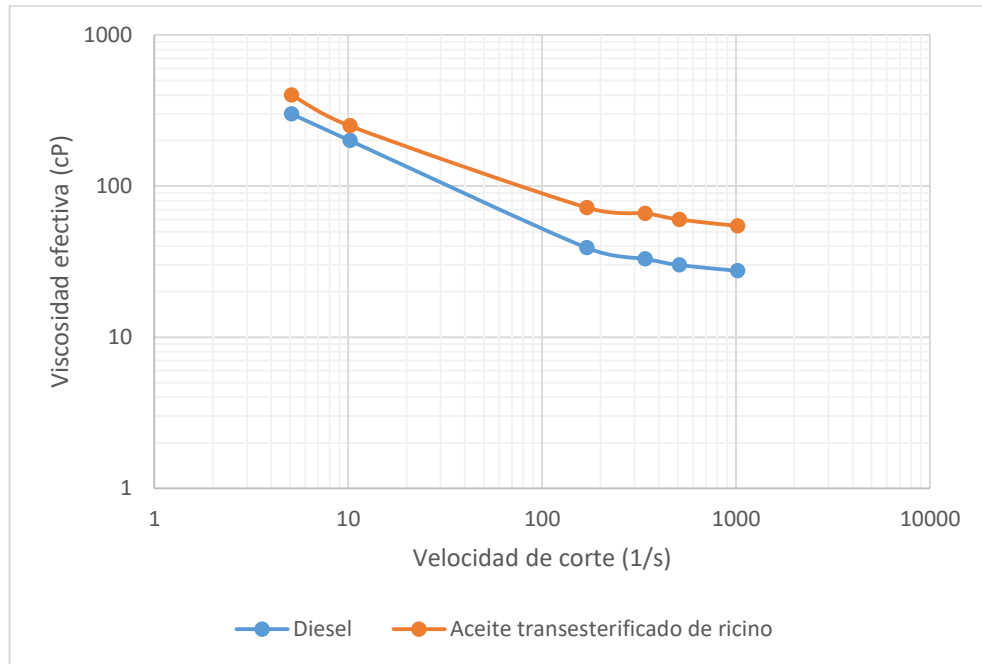
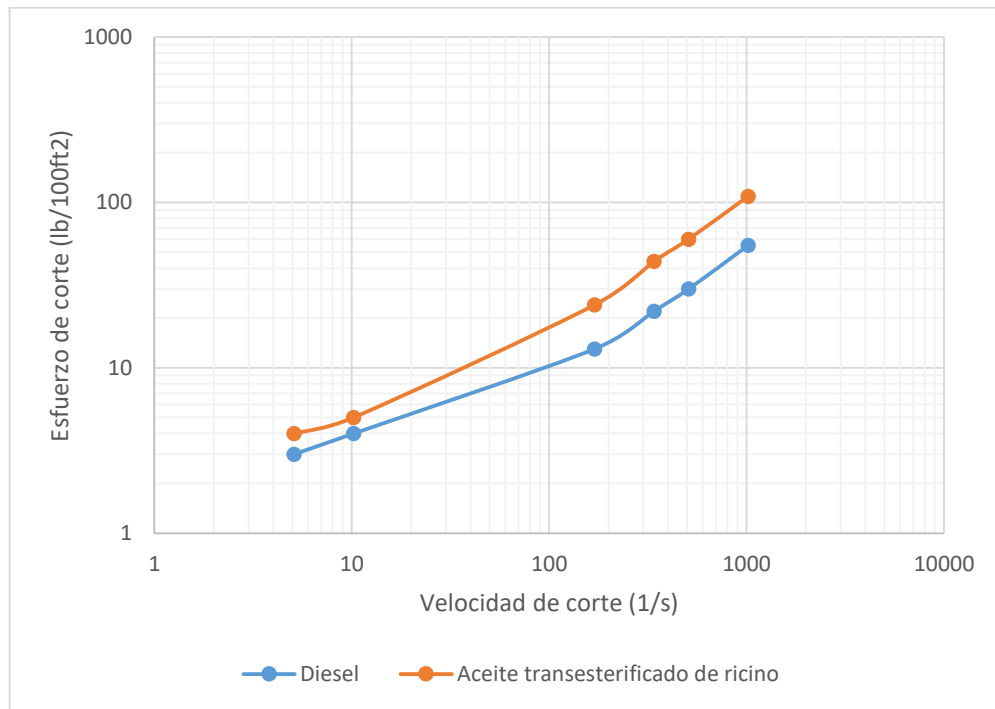


Figura 13. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 85/15.



En las Figuras 12 y 13 se puede observar que los fluidos de perforación de emulsión inversa tanto base aceite transesterificado de ricino como base diesel exhiben un comportamiento pseudoplástico, es decir que su viscosidad efectiva disminuye con la velocidad de corte lo cual permite una limpieza eficaz del pozo; además la remoción de recortes es mejor para los fluidos que exhiben altas viscosidades a bajas velocidades de corte⁷¹, y en este sentido la formulación base aceite transesterificado de ricino presenta buena propiedad de remoción que podría ser útil sobre todo en pozos de alto ángulo donde el fluido está perforando a bajas velocidades anulares⁷¹. El hecho de que el lodo base biodiesel de ricino presente viscosidades un poco mayores que las del lodo base diesel permite que el primero efectúe una mejor limpieza, aunque la velocidad de penetración se verá un poco reducida.

Como se evidencia en la Tabla 19, la diferencia entre los datos de viscosidad obtenidos para ambos fluidos no es demasiado alta, tal como lo indican los valores de coeficiente de variación, el cual representa la heterogeneidad entre los resultados para ambos lodos, pues para ninguna velocidad de corte éste supera el 33,5 %. Además como se observa en las Figuras 12 y 13, el comportamiento reológico de ambos fluidos es similar.

Basados en el modelo de ley de la potencia se calcularon los valores del índice de comportamiento n , el cual es una medida de la desviación del comportamiento reológico del lodo con respecto a los fluidos newtonianos, y el índice de consistencia k , el cual es una medida de la consistencia del fluido y por ende una medida indirecta de la viscosidad. Estos índices se calcularon utilizando las ecuaciones presentadas a continuación.

Dado que la ley de la potencia se expresa como⁷²:

$$\tau = K\gamma^n$$

⁷¹ BAROID, *Op cit.*

⁷² M-I & SWACO, *Op cit.*

Donde:

- τ : Esfuerzo de corte en lb/100ft².
- K: Índice de consistencia.
- γ : Velocidad de corte en 1/s.
- n: Índice de comportamiento no newtoniano.

Al evaluarla a dos velocidades de corte resultan:

$$\tau_1 = K\gamma_1^n$$

$$\tau_2 = K\gamma_2^n$$

A partir de éstas se obtiene el índice de comportamiento no newtoniano n y el índice de consistencia k :

$$n = \frac{\text{Log}\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\text{Log}\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)}$$

$$K = \frac{\tau_1}{\gamma_1^n}$$

Donde:

- n: Índice de comportamiento.
- K: Índice de consistencia.
- τ_1 : Esfuerzo de corte a una velocidad de corte más baja (θ_3 , θ_{100} ó θ_{300}) en lb/100ft².
- τ_2 : Esfuerzo de corte a una velocidad de corte más alta (θ_6 , θ_{200} ó θ_{600}) en lb/100ft².
- γ_1 : Velocidad de corte más baja (θ_3 , θ_{100} ó θ_{300}) en 1/s.
- γ_2 : Velocidad de corte más alta (θ_6 , θ_{200} ó θ_{600}) en 1/s.

Los valores de n y k se calcularon a bajas velocidades de θ_6 y θ_3 (n_b y k_b), velocidades medias de θ_{200} y θ_{100} (n_m y k_m) y velocidades altas de θ_{600} y θ_{300} (n_a y k_a) como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de n y k para la formulación 85/15.

	nb	nm	na	kb	km	ka
Aceite transesterificado de ricino	0,32	0,87	0,86	2,37	0,27	0,28
Diesel	0,42	0,76	0,87	1,53	0,26	0,13

Según los valores de la Tabla 20, ambos fluidos poseen índices de comportamiento menor a la unidad con lo cual se alejan del fluido newtoniano cuya la viscosidad permanece constante en el tiempo. Para velocidades de corte bajas y altas, el lodo preparado con aceite transesterificado de ricino presenta un comportamiento más alejado del newtoniano que el preparado con diesel, pero sucede lo contrario a velocidades medias. A su vez, el índice de consistencia es mayor para el fluido base aceite transesterificado de ricino, y dado que a menor índice n y mayor k , se favorece la capacidad de dicho lodo para limpiar el hoyo y suspender de los recortes, el lodo base biodiesel de ricino exhibe un comportamiento reológico adecuado.

4.2.4.2. Relación O/W 80/20

En la Tabla 21 se presentan las propiedades medidas para la formulación de relación aceite/agua 80/20 tanto para el fluido base aceite transesterificado de ricino como para el base diesel.

Tabla 21. Resultados Formulación O/W 80/20.

Variable	Unidades	Aceite transesterificado de ricino	Diesel
θ600	lb/100ft2	119	79
θ300	lb/100ft2	65	48
θ200	lb/100ft2	47	38
θ100	lb/100ft2	25	24
θ6	lb/100ft2	5	9
θ3	lb/100ft2	3	8
Resistencia Gel 10''/ 10'	lb/100ft2	2/3	10/11
VP	cP	54	31
VA	cP	59,5	39,5
YP	lb/100ft2	11	17
Filtrado API	ml	9	2
Densidad	ppg	10	10
Cake		consistente	consistente
		plástica	plástica
		<1/32''	<1/32''

Para esta formulación, dado que posee un mayor porcentaje de agua, los esfuerzos de corte exhibidos son más altos que los mostrados por la formulación 85/15, y por ende también la viscosidad plástica, viscosidad aparente y punto cedente. El valor de viscosidad plástica es mayor en un 74% y la viscosidad aparente en un 50,6% para el fluido base de aceite transesterificado de ricino que para el base diesel, sin embargo esta diferencia no es tan pronunciada e incluso podría favorecer la limpieza del hoyo. En cuanto al punto cedente, ambos fluidos presentan buenos valores, siendo mayor para el fluido base diesel que para el lodo base aceite transesterificado de ricino, por lo cual el esfuerzo requerido para iniciar el flujo del

primero es mayor que para el segundo, pero su capacidad de acarreo se ve favorecida.

Los esfuerzos de gel no muestran una diferencia significativa entre los valores de 10 segundos y 10 minutos para ninguno de los dos fluidos, lo cual indica que no forman geles progresivos. No obstante, como se muestra en la Tabla 21, los esfuerzos de gel de la formulación preparada con aceite transesterificado de ricino son significativamente más bajos que los del lodo preparado con diesel, con lo cual se puede concluir que el lodo preparado con biodiesel de ricino no traería complicaciones bajo condiciones estáticas, puesto que esfuerzos de gel excesivos pueden acarrear problemas como entrapamiento del aire o gas en el fluido, presiones excesivas cuando se interrumpe la circulación o aumento de la misma al introducir tubería en el pozo, entre otros⁷³.

Las pérdidas de filtrado para el fluido base diesel estuvieron dentro del rango recomendado (<7 mL), mientras que para el fluido preparado con aceite transesterificado de ricino dichas pérdidas fueron de 9 mL, valor que se encuentra fuera dicho rango, por lo cual si se aplicara para la perforación de pozos podría ocasionar pérdidas de circulación y daños a la formación cuando ésta es muy permeable⁷⁴. Cabe resaltar que el filtrado de ambas formulaciones fue 100% aceite, lo cual indica que la cantidad de emulsificante agregada al lodo es suficiente para mantener la emulsión agua en aceite estable. En la Figura 14 se presentan las tortas obtenidas para ambos lodos, las cuales muestran buenas propiedades, es decir, ambas con consistentes, plásticas y de un espesor menor a 1/32'', asegurando con ello la estabilidad del pozo y obturación de las paredes.

⁷³ ESTERLIN, Juan Gabriel, y GOMEZ HERREÑO, Miguel Armando. Metodología para el cálculo de reología e hidráulica para pozos estratigráficos profundos, usando una herramienta software (COMPASS Y WELL PLAN). Tesis de Pregrado en Ingeniería de petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2011.

⁷⁴ BAROID, *Op cit.*

Figura 14. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 80/20.



En la Tabla 22 se presenta la reología y en las Figuras 15 y 16, el comportamiento reológico para la formulación de O/W: 80/20 tanto para el fluido base aceite transesterificado de ricino como para el base diesel.

Tabla 22. Reología Formulación O/W 80/20.

RPM	V (1/s)	Aceite transesterificado de ricino		Diesel		Desviación estándar para μEfec	Coeficiente de variación (%)
		Esf. de corte (lb/100ft ²)	μEfec (cP)	Esf. de corte (lb/100ft ²)	μEfec (cP)		
0600	1020	119	59,5	79	39,5	10	20,20
0300	510	65	65	48	48	8,5	15,04
0200	340	47	70,5	38	57	6,75	10,59
0100	170	25	75	24	72	1,5	2,04
06	10,2	5	250	9	450	100	28,57
03	5,1	3	300	8	800	250	45,45

Figura 15. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 80/20.

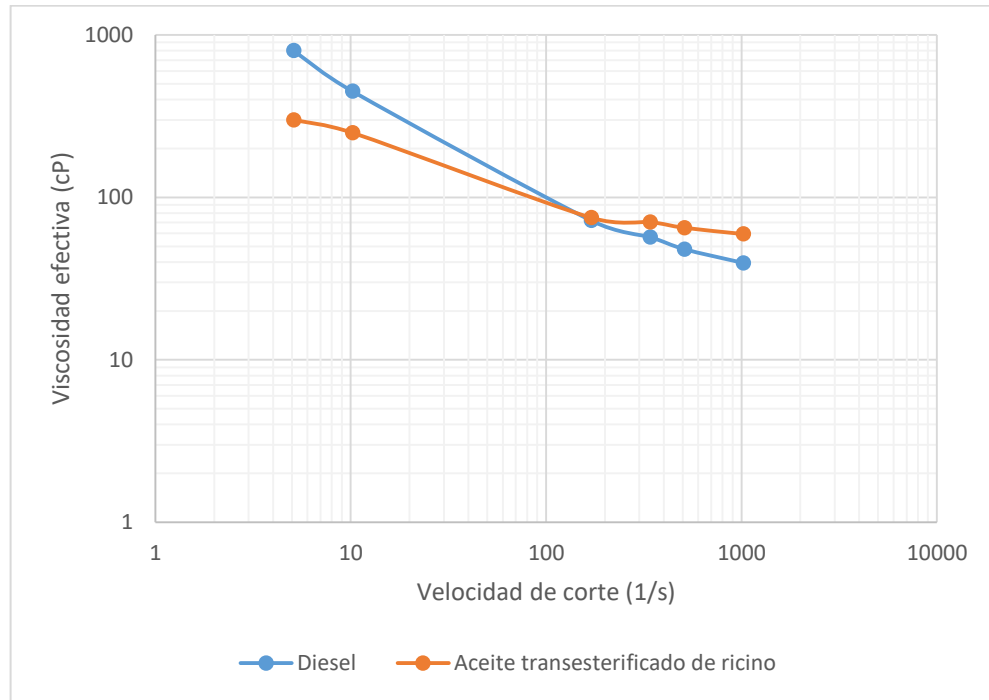
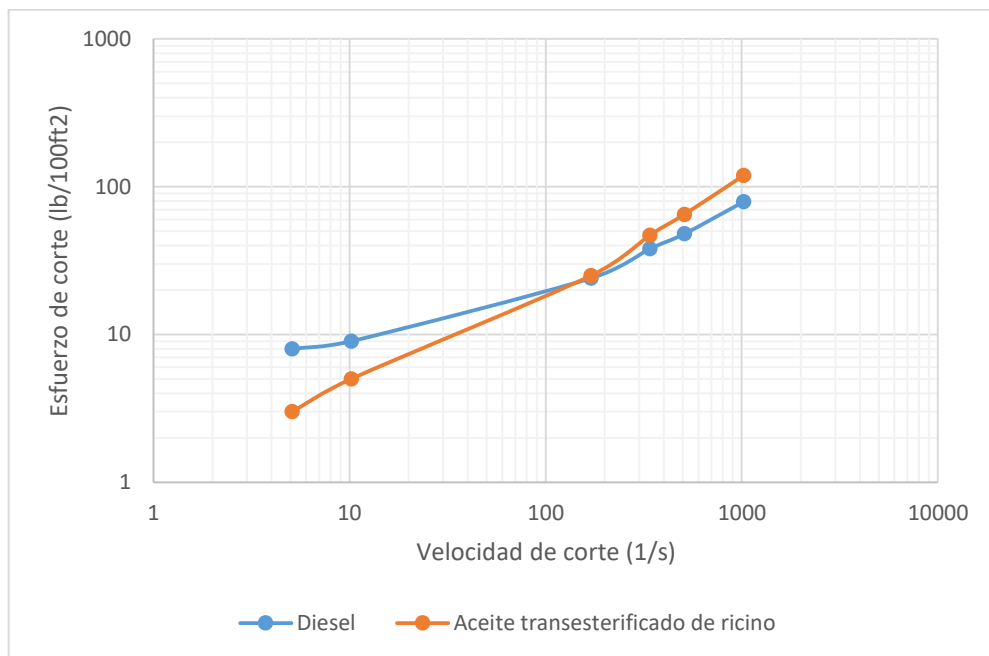


Figura 16. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 80/20.



En Tabla 22 y Figuras 15 y 16 se puede observar el comportamiento no newtoniano pseudoplástico de ambos fluidos, ya que disminuyen su viscosidad efectiva con la velocidad de corte. Se evidencia que, a bajas velocidades de corte, la viscosidad efectiva del lodo base diesel es mayor que para el lodo base biodiesel de ricino, lo que permite intuir que la limpieza del hoyo a bajas velocidades anulares es mejor con el lodo base diesel para esta formulación, caso contrario a la anterior de 85/15 donde el lodo base biodiesel de ricino podría brindar una mejor remoción de recortes a bajas velocidades. Asimismo, en algún punto entre $\theta 100$ y $\theta 6$ las gráficas del fluido base aceite transesterificado de ricino y base diesel se cruzan, después del cual los papeles se invierten y el primero presenta mayores viscosidades que el segundo. Como ya se mencionó anteriormente, esto podría ser favorable para la remoción de recortes, y dado que no existe gran diferencia de viscosidades entre los dos fluidos, como se evidencia en los valores de coeficiente de variación, los cuales son menores de 45,5 %, el lodo base aceite transesterificado de ricino podría utilizarse para la operación de perforación.

En la Tabla 23, se muestran los valores del índice de consistencia k y el índice de comportamiento n para la formulación 80/20 con ambos aceites, calculados mediante el modelo de la ley de la potencia a bajas, medias y altas velocidades de manera similar a la formulación anterior. El valor de n es menor que la unidad para ambos fluidos, lo que indica un comportamiento no newtoniano⁷⁵. En cuanto a los valores de k , éstos son menores para el lodo preparado con el aceite transesterificado de ricino, contrario a lo mostrado en la formulación con relación aceite/agua 85/15, con lo cual podría decirse que el lodo base diesel tiene mayor eficiencia para limpiar el hueco y suspender los ripios.

⁷⁵ GUARACHI, L., *Op cit.*

Tabla 23. Valores de n y k para la formulación 80/20

	nb	nm	na	kb	km	ka
Aceite transesterificado de ricino	0,74	0,91	0,87	0,90	0,23	0,28
Diesel	0,17	0,66	0,72	6,07	0,80	0,54

4.2.4.3. Relación O/W 75/25

En la Tabla 24 se exhiben los resultados de las propiedades medidas para la formulación de relación aceite/agua 75/25 tanto para el lodo base aceite transesterificado de ricino como para el base diesel.

Tabla 24. Resultados Formulación O/W 75/25.

Variable	Unidades	Aceite transesterificado de ricino	Diesel
θ600	lb/100ft ²	146	88
θ300	lb/100ft ²	80	53
θ200	lb/100ft ²	57	42
θ100	lb/100ft ²	31	28
θ6	lb/100ft ²	5	12
θ3	lb/100ft ²	3	10
Resistencia Gel 10''/ 10'	lb/100ft ²	3/4	10/11
VP	cP	66	35
VA	cP	73	44
YP	lb/100ft ²	14	18
Filtrado API	ml	9,6	1
Densidad	ppg	10	10,1
Cake		consistente	consistente
		plástica	plástica
		<1/32''	<1/32''

Como se evidencia en la Tabla 24 los esfuerzos de corte exhibidos por la formulación 75/25 para ambos aceites son mayores que los obtenidos para las anteriores formulaciones de 85/15 y 80/20, esto ocurre debido a que esta es la formulación con mayor porcentaje de fase acuosa, con lo cual la viscosidad del fluido resultante es mayor.

Los esfuerzos de corte exhibidos por lodo preparado con aceite transesterificado de ricino son más altos que los mostrados por el lodo base diesel, no obstante, a medida que la velocidad de corte disminuye, la diferencia entre dichos valores también se ve reducida, hasta alcanzar las bajas velocidades de θ_6 y θ_3 a las cuales los esfuerzos de corte del lodo base diesel se hacen mayores que para el lodo base biodiesel de ricino, indicando con ello que el primero podría brindar una mejor limpieza a bajas velocidades. En cuanto a la viscosidad aparente y plástica, ambas son mayores para el fluido base aceite transesterificado de ricino, lo cual se presenta debido a que la fase continua, en este caso biodiesel de ricino, es más viscosa que el diesel. Asimismo, el esfuerzo cedente es menor para el fluido base aceite transesterificado de ricino que para el lodo base diesel, con lo cual este último favorece en mayor medida la limpieza del pozo. Cabe resaltar que según los resultados obtenidos para las distintas formulaciones, a mayor porcentaje de agua en la emulsión, el punto de cedencia se incrementa, esto puede deberse a que el agua en pequeñas gotas se comporta como sólidos, por lo que a mayor fase acuosa mayor punto de cedencia.

Por otra parte, los esfuerzos gel para el lodo base biodiesel de ricino son menores que para el lodo base diesel, por lo que con el primero se minimiza el efecto de succión cuando se saca la sarta del hoyo y de pistón cuando se introduce, además por los esfuerzos gel bajos permite una separación del gas incorporado al lodo⁷⁶. Adicionalmente, los esfuerzos gel de 10 segundos y 10 minutos no exhiben una

⁷⁶ GALORA, Mesias Viteri y GALLEGOS ORTA, Ricardo. Estudio experimental mediante normas API de un yacimiento de barita de la provincia de Morona Santiago para su uso en fluido de perforación. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Escuela Politécnica del Litoral. Facultad de Ciencias de la Tierra. Guayaquil, 1999.

diferencia significativa para ninguno de los dos fluidos, lo cual indica que se comportan como geles planos.

El filtrado obtenido para el lodo base diesel (1 mL) está dentro del rango permisible (<7 mL), sin embargo, para el fluido base aceite transesterificado de ricino las pérdidas de filtrado se ubican fuera de dicho rango (9,6 mL), además para esta formulación dichas pérdidas fueron mayores que para las otras formulaciones. El filtrado del lodo base diesel fue 100% aceite indicando una emulsión inversa estable, mientras que para el lodo base biodiesel de ricino presentó un 9% de fase acuosa como se puede observar en el Anexo E con lo cual la emulsión agua en aceite para este fluido no es estable.

Las tortas obtenidas para ambos fluidos exhiben excelentes propiedades como se evidencia en la Figura 17, donde se observa que ambas tortas fueron consistentes, plásticas y de espesor menor a 1/32'', con lo cual se contribuye de manera efectiva a la estabilidad y sostenimiento de las paredes del hoyo.

Figura 17. Tortas diesel y aceite transesterificado de ricino 75/25.



En la Tabla 25 se presenta la reología para la formulación de O/W: 75/25 para el fluido base aceite transesterificado de ricino y base diesel; adicionalmente en las Figuras 18 y 19 se presenta el comportamiento reológico para los lodos preparados con ambos aceites.

Tabla 25. Reología Formulación O/W 75/25.

RPM	V (1/s)	Aceite transesterificado de ricino		Diesel		Desviación estándar para μ Efec	Coeficiente de variación (%)
		Esf. de corte (lb/100ft ²)	μ Efec (cP)	Esf. de corte (lb/100ft ²)	μ Efec (cP)		
0600	1020	146	73	88	44	14,5	24,79
0300	510	80	80	53	53	13,5	20,30
0200	340	57	85,5	42	63	11,25	15,15
0100	170	31	93	28	84	4,5	5,08
06	10,2	5	250	12	600	175	41,18
03	5,1	3	300	10	1000	350	53,85

Figura 18. Viscosidad efectiva vs Velocidad de corte O/W: 75/25.

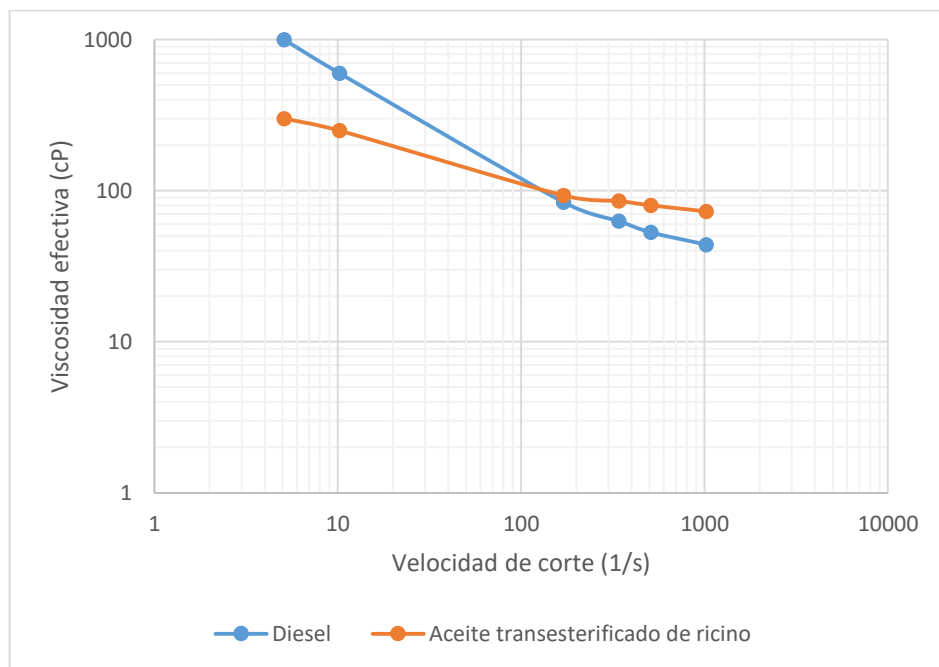
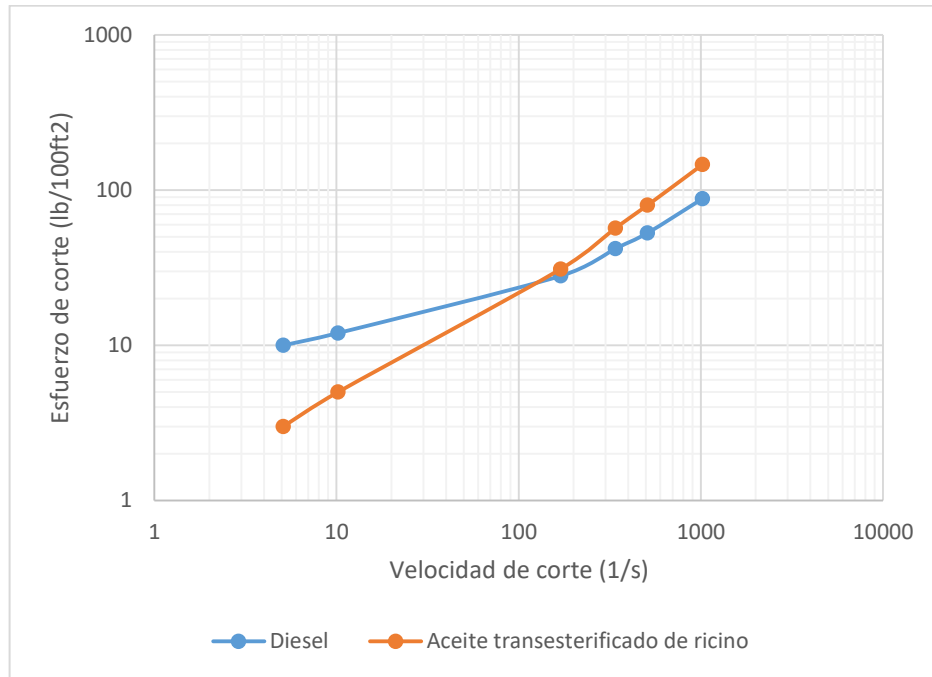


Figura 19. Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte O/W: 75/25.



En las Figuras 18 y 19 se puede observar que tanto el lodo de emulsión inversa base aceite transesterificado de ricino como base diesel presentan un comportamiento pseudoplástico dado que su viscosidad efectiva disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte; sin embargo, dicha disminución es más pronunciada para el lodo base diesel, y a su vez el crecimiento del esfuerzo de corte con la tasa de corte es más paulatino para éste que para el lodo base aceite transesterificado de ricino. Asimismo, se puede observar que, de la misma manera que para la formulación 80/20, el fluido preparado con biodiesel de ricino, exhibe menores viscosidades a bajas velocidades de corte (LSRV), lo que indica que fluido base diesel permitiría una mejor limpieza en la sección transversal del pozo impidiendo la sedimentación de los recortes en la parte baja del mismo⁷⁷. Una vez la tasa de corte pasa por un valor entre $\theta 100$ y $\theta 6$ las gráficas el fluido base aceite

⁷⁷ BAROID, *Op cit.*

transesterificado de ricino y base diesel se cruzan, y éste último presenta menores viscosidades que el lodo base biodiesel de ricino a altas velocidades. Sin embargo, el grado de heterogeneidad entre los valores de viscosidad obtenidos para ambos fluidos no es demasiado alto, como se evidencia en los coeficientes de variación (tabla 25) siendo éstos menores a 54%. Con base en esto, el lodo base aceite transesterificado de ricino podría desempeñar de manera satisfactoria las funciones de limpieza y suspensión de recortes durante la perforación de un pozo.

En la Tabla 26 se muestran los valores del índice de comportamiento n , y el índice de consistencia k , los cuales fueron calculados a altas, medias y bajas velocidades basados en el modelo de ley de la potencia de manera similar a las formulaciones anteriores.

Tabla 26. Valores de n y k para la formulación 75/25.

	nb	nm	na	kb	km	ka
Aceite transesterificado de ricino	0,74	0,88	0,87	0,90	0,34	0,36
Diesel	0,26	0,58	0,73	6,51	1,39	0,55

Según los valores de la Tabla 26, ambos fluidos poseen índices de comportamiento n menor a la unidad con lo cual se alejan del comportamiento newtoniano, sin embargo dichos valores son menores para el lodo base diesel, y dado que a menor índice n la velocidad del fluido aumenta sobre un área más grande del espacio anular, la limpieza del hueco con este fluido es mejor⁷⁸. Por otra parte, el índice de consistencia k es mayor para el lodo base diesel que para el base aceite transesterificado de ricino de manera similar a la formulación 80/20, favoreciendo así la capacidad del primer fluido en la suspensión de recortes y limpieza del pozo.

⁷⁸ GUARACHI, L., *Op cit.*

5. CONCLUSIONES

Con la reacción de transesterificación se logró reducir notablemente la viscosidad del aceite de ricino de 267,2 cP a valores en el rango de 14,4 a 16,9 cP, medida a 40 °C (104 °F). Asimismo, se identificó que a menor relación molar alcohol: aceite se obtiene mayor reducción en la viscosidad respecto al aceite crudo de ricino. Por otra parte, el porcentaje de catalizador no afecta significativamente la viscosidad del producto.

Las condiciones de reacción elegidas para la obtención del aceite transesterificado de ricino a utilizar en las formulaciones de los lodos de emulsión inversa fueron una relación molar alcohol: aceite de 6:1, un porcentaje de catalizador KOH de 1 %p/p, una temperatura de reacción de 30 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos.

Según la caracterización realizada al aceite transesterificado de ricino obtenido, éste cumple con las propiedades recomendadas para ser utilizado en los lodos base aceite.

El biodiesel de ricino es compatible con todos los aditivos empleados para la preparación de las formulaciones llevadas a cabo en este proyecto.

Desde el punto de vista reológico, el uso de aceite transesterificado de ricino en lodos de emulsión inversa es factible técnicamente. A pesar de que el fluido preparado con dicho aceite exhibe viscosidades mayores a las del fluido base diesel, las diferencias no son excesivas, por lo cual el biodiesel de ricino puede utilizarse en los lodos de perforación.

Para la formulación 85/15, tanto el lodo base aceite transesterificado de ricino como el lodo base diesel presentan la misma tendencia en su comportamiento reológico. Sin embargo, dado que a bajas velocidades de corte las viscosidades obtenidas para el fluido base biodiesel de ricino fueron mayores a las obtenidas para el lodo base diesel, el primero podría presentar mejores propiedades de limpieza a dichas velocidades en caso de ser aplicado en campo. Por tanto, el lodo de emulsión

inversa de esta relación aceite/agua preparado con aceite transesterificado de ricino podría emplearse en pozos con velocidades anulares bajas, tales como pozos de alto ángulo de desviación, horizontales o de grandes diámetros.

Las pérdidas de filtrado obtenidas para los fluidos preparados con aceite transesterificado de ricino estuvieron por encima del rango recomendable en las formulaciones estudiadas.

6. RECOMENDACIONES

Llevar a cabo la reacción de transesterificación del aceite de ricino utilizando etanol como sustituto del metanol, dado que el primero es menos tóxico y más económico. Lo anterior permitiría disminuir los costos del proceso y, por ende, del lodo de perforación preparado a partir del biodiesel de ricino.

Aumentar la cantidad de controlador de filtrado para las formulaciones preparadas con aceite transesterificado de ricino con el fin de disminuir las pérdidas de filtrado. Adicionalmente, para la formulación 75/25 agregar más emulsificante para mantener la emulsión agua en aceite estable. Asimismo, probar otros controladores de filtrado con el fin observar su efecto en la filtración para los lodos base aceite transesterificado de ricino.

Ampliar el presente estudio mediante la preparación de formulaciones de otros sistemas de emulsión inversa con el fin de establecer el mejor rango de aplicabilidad de los lodos base aceite preparados con el aceite transesterificado de ricino. A su vez estudiar bajo qué condiciones estos lodos presentarían su mejor comportamiento.

Realizar pruebas de alta presión y alta temperatura, de envejecimiento, de estabilidad eléctrica y pruebas químicas a los lodos base aceite transesterificado de ricino para estudiar más a fondo la factibilidad de su utilización.

BIBLIOGRAFIA

- AGWU, Okorie; ISEMIN, Isemin and AKPABIO, Moses. Cost Benefit Analysis of Vegetable Oils Used As Alternatives to Diesel in the Formulation of Oil-Based Drilling Muds. En: Society of Petroleum Engineers, SPE-178265-MS. Agosto, 2015.
- Amoco Production Company. Drilling Fluids Manual. Amoco Corporation, 1994.
- AUTA, Manase. Extraction and Characterization of Drilling Fluid from Castor Oil. En: International Journal of Innovation and Applied Studies. Junio, 2013, vol. 3, no. 2, p. 382-387.
- AVELLANEDA VARGAS, Fredy Augusto. Producción y caracterización de biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso de Batch y un proceso continuo con un reactor Helicoidal. Tesis Doctoral en Ingeniería Química, Ambiental y Procesos. Universitat Rovira I Virgili. Departamento de Ingeniería Química. Tarragona, 2010.
- Baker Hughes INTEQ. Fluidos Manual de Ingeniería. Baker Hughes Incorporated. Houston, TX, USA, 1998.
- BAROID. Manual de Fluidos. Baroid/Halliburton Energy Services Inc., Houston, TX, USA, 1999.
- BENAVIDES AYALA, Fabio Ernesto; QUINTERO GÓMEZ, Jimmy y ARIZA LEÓN, Emiliano. Estudio de factibilidad del uso del Biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. En: Revista Fuentes: El Reventón Energético. Enero-Junio, 2011, vol. 9, no. 1, p. 57-64.

- BENAVIDES AYALA, Fabio Ernesto y QUINTERO GÓMEZ, Jimmy. Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2010.
- BERMAN, Paula; NIZRI, Shahar and WIESMAN, Zeev. Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. En: Biomass and Bioenergy. Julio, 2011, vol. 35, no. 7, p. 2861-2866.
- BERNA ARTEAGA, Tatiana e ILIAS MELGAREJO, Ibis. Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2008.
- COHA VESGA, Pablo Miguel y ROJAS PUENTE, Laura Carolina. Obtención y caracterización de biodiesel por medio de la transesterificación en medio básico del aceite de higuera con diferentes alcoholes. Tesis de Pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, 2009.
- DEEP, A.; SANDHU, S.S. and CHANDER, S. Optimization of Reaction Parameters of Transesterification for Castor Oil. En: Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR). Febrero, 2017, vol. 76, p. 115-118.
- DESHPANDE, D.P., *et al.* Transesterification of Castor Oil. En: ISCA Journal of Engineering Sciences. Julio, 2012, vol. 1, no. 1, p. 2-7.
- DUNN, Kevin. Scientific Soapmaking: The chemistry of the Cold Process. Clavícula Press, 2010.

- ESTERLIN, Juan Gabriel y GOMEZ HERREÑO, Miguel Armando. Metodología para el cálculo de reología e hidráulica para pozos estratigráficos profundos, usando una herramienta software (COMPASS Y WELL PLAN). Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Bucaramanga, 2011.
- FADAIRO, Adesina, *et al.* Novel Formulation of Environmentally Friendly Oil Based Drilling Mud. *New Technologies in the Oil and Gas Industry*, 2012, p. 49-80. ISBN 978-953-51-0825-2.
- GALORA, Mesias Viteri y GALLEGOS ORTA, Ricardo. Estudio experimental mediante normas API de un yacimiento de barita de la provincia de Morona Santiago para su uso en fluido de perforación. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Escuela Politécnica del Litoral. Facultad de Ciencias de la Tierra. Guayaquil, 1999.
- GUARACHI LAURA, Fredy. Guía de fluidos de perforación y laboratorio. [En línea]. (Recuperado el 30 de Noviembre de 2016). Disponible en <http://es.slideshare.net/Rolando000/guia-de-fluidos-de-perforacin>.
- IBRAHIM, Suzan. Esterification Reaction for Novel synthesis Castor-based Polyester and Formulation as Base Oil in Synthetic Drilling Fluid. En: *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Diciembre, 2014, vol. 3, no. 12, p. 1969-1975.
- LEÓN PABÓN, John Alexander y TORRES LÓPEZ, Mario. Guía práctica de laboratorio de Fluidos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2013.

- MARDHIANA BINTI, Ismail; GHAZI FAISAL, Najmuldeen and WAN MOHD HAFIZUDDIN, Wan Yussof. Exploring the Transesterification of Castor Oil to Produce Second Generation Biodiesel using a Novel Catalyst. En: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Enero, 2015, vol. 4, no.1, p. 289-293.
- MENEGHETTI PLENTZ, Simoni, *et al.* Biodiesel from Castor Oil: A Comparison of Ethanolysis versus Methanolysis. En: Energy & Fuels. Julio, 2006, vol. 20, no. 5, p. 2262-2265.
- M-I & SWACO. Drilling Fluids Engineering Manual, 2001.
- MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. 2, Limusa Wiley. México, 2004.
- MUÑOZ HERNÁNDEZ, Oscar Leonardo y MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Tesis de Pregrado en Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Bucaramanga, 2012.
- MURAT, Kilic, *et al.* Optimization of biodiesel production from castor oil using factorial design. En: Fuel Processing Technology. Marzo, 2013, vol. 111, p. 105-110.
- NAKARMI, Amita and JOSHI, Susan. A Study on Castor Oil and Its Conversion into Biodiesel by Transesterification Method. En: Nepal Journal of Science and Technology. Junio, 2014, vol. 15, no.1, p. 45-52.
- PDVSA. Fluidos de Perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo CIED, 2002.

- PINZON BELLO, Jorge Alejo. Suspensions Viscosity of a Natural and Organophilic Bentonite. En: Revista Colombiana de Química. Julio-Diciembre, 2006, vol.35, no.2, p. 225-232.
- RAMIREZ, Luis Enrique y CARDENAS CHALA, Diego Leandro. Evaluación del proceso de producción de la higuera como alternativa energética de bajo nivel de contaminación ambiental. Tesis de Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Bogotá D.C., 2005.
- RAMIREZ GARCÍA, Yusney Andrea. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Tesis de Pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Bucaramanga, 2016.
- SÁNCHEZ MEDINA, Iris Adriana y HUERTAS GRECO, Karina. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de Ricinus Communis (Higuera) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. Tesis de Pregrado en Química Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de Química Industrial. Pereira, 2012.
- SCHOLZ, Volkhard and NOGUEIRA DA SILVA, Jadir. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. En: Biomass and Bioenergy. Febrero, 2008, vol. 32, no. 2, p. 95-100.
- SETYAWAN, Wachid, *et al.* Alternative use of castor oil for vegetable oil-based mud environmentally friendly potential domestic oil based-mud. Thirty-Fifth IPA Convention & Exhibition, Indonesia. Mayo, 2011.
- SOUSA, Louise; LUCENA, Izabelly and FERNANDES, Fabiano. Transesterification of castor oil: Effect of the acid value and neutralization of the oil with glycerol. En: Fuel Processing Technology. Febrero, 2010, vol. 91, no. 2, p. 194-196.

- VEGA, Rubén. Factibilidad de uso de los aceites naturales de tártago (*Euphorbia Lathyris*), Palma aceitera (*Elaeis Guineensis*) y Soya (*Glycine Max*) como fluidos de perforación base aceite. Universidad de Oriente Núcleo de Monagas. Maturín, 2011.

ANEXOS

Anexo A. FICHA TÉCNICA ACEITE DE RICINO (Laboratorios León S.A.)

Por ser un producto de origen vegetal, algunas de sus propiedades dependen del manejo que se le haga al grano de extracción; otras dependen de las condiciones del proceso en sí y de la refinación, tales como temperatura, presión, vacío, concentración de reactivo y tiempos de proceso, pudiendo ser variadas a voluntad para obtener características finales específicas.

1. Descripción: líquido viscoso, amarillento pálido, transparente con olor suave, y sabor característico, usualmente muy desagradable.

2. Especificaciones:

- Color (Iovibond 5 1/4): amarillo 16- rojo 1,4
- Acidez: 0,91
- Humedad y volátiles: 0.20%
- Peso específico a 25 °C: 0,955-0,965
- Índice de Yodo: 82-85
- Índice de Refracción a 25 ° C: 1,473-1,477
- Índice de Saponificación: 176-168
- Índice de hidroxilo: 160-168
- Impurezas solubles: 0,01%

Anexo B. UNE EN ISO 600

Norma Europea para la determinación del índice de acidez y de la acidez para aceites y grasas de origen animal y vegetal.

El índice de acidez corresponde a la cantidad de hidróxido de potasio en miligramos necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de aceite o grasa. Su determinación se realiza de la siguiente manera:

- Se prepara la solución patrón de KOH en etanol a una concentración de 0,1 mol/L la cual se verifica con la neutralización con ácido benzoico disuelto en 4-metil-2-pentanona.
- Se neutraliza el solvente a utilizar (2-propanol) mediante la adición de disolución de hidróxido potásico en etanol, en presencia de fenolftaleína.
- Se pesan 20 g de muestra (aceite o grasa) en un matraz.
- Se disuelve la muestra en 100 mL de 2-propanol y se titula con la solución patrón de KOH en etanol manteniendo agitación hasta alcanzar el punto de equivalencia.
- Se calcula el índice acidez con la siguiente relación:

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

Donde V es el volumen (mL) de solución patrón usada, c es la concentración exacta (mol/L) de la solución patrón, y m es la masa (g) la muestra.

- El %AGL se calcula así:

$$\%AGL = \frac{V * c * 282}{10 * m}$$

Donde V es el volumen (mL) de solución patrón usada, c es la concentración exacta (mol/L) de la solución patrón, y m es la masa (g) la muestra.

Anexo C. EN 14103

Norma Europea para la determinación del contenido de ésteres de ácidos grasos (FAME) y de éster metílico de ácido linoleico de productos derivados de aceites y grasas.

El contenido de metilésteres se determina mediante cromatografía de gases por duplicado para cada muestra utilizando el patrón heptadecanoato metílico y llevando a cabo los siguientes pasos:

- Se prepara la solución patrón a 10mg/ml de heptadecanoato metílico enrasado con heptano.
- Se pesan aproximadamente 250 mg de muestra en un vial de 10 mL y se agregan 5 mL de la solución patrón con una pipeta aforada.
- Se establecen las condiciones de la cromatografía de gases de manera que se puedan apreciar correctamente los picos de los ésteres metílicos desde el meristato lignocérico (C14:0) hasta en nerviónico (C24:1).

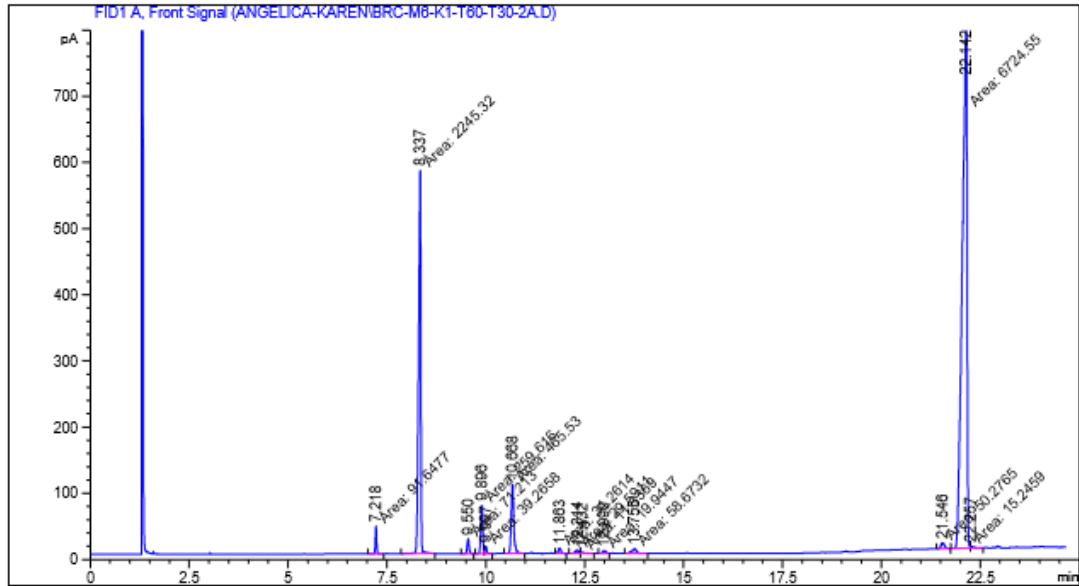
Una vez obtenido el cromatograma se calcula el contenido de éster con la siguiente relación:

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

Donde $\sum A$ es el área total de todos los picos desde el éster metílico C14:0 hasta C24:1, A_{EI} es el área del pico del heptadecanoato metílico, C_{EI} es la concentración de la disolución de heptadecanoato metílico (mg /mL), V_{EI} es el volumen de la disolución de heptadecanoato metílico (mL) y m es la masa de la muestra (mg).

Anexo D. CROMATOGRAMA

Para cada experimento se obtuvieron dos cromatogramas y se calculó el % FAME con la fórmula presentada en el anexo C, y se tomó el valor promedio de éstos. A continuación se presenta el cromatograma obtenido para el experimento 4 de la reacción de transesterificación del aceite de ricino medición A. Relación molar alcohol: aceite 6:1, cantidad de catalizador KOH 1% a una temperatura de 30 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos.



Signal 1: FID1 A, Front Signal

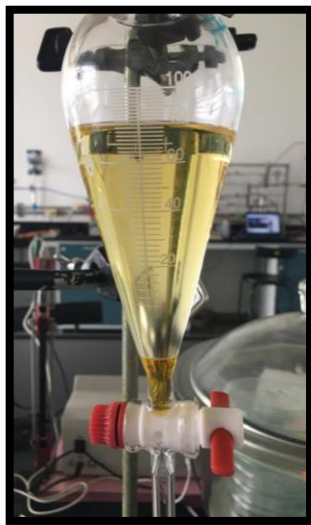
Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	7.218	MM	0.0366	91.64772	41.75753	0.90593
2	8.337	MM	0.0645	2245.32275	579.75537	22.19471
3	9.550	MM	0.0552	71.21296	21.51437	0.70393
4	9.896	MF	0.0587	259.61627	73.66712	2.56627
5	9.997	FM	0.0604	39.26580	10.83229	0.38814
6	10.668	MM	0.0744	465.52951	104.27374	4.60170
7	11.863	MM	0.0721	34.26141	7.92253	0.33867
8	12.314	MF	0.1009	29.59107	4.88619	0.29250
9	12.432	FM	0.1043	11.33694	1.81190	0.11206
10	12.990	MM	0.0900	19.94469	3.69233	0.19715
11	13.755	MM	0.1430	58.67321	6.83770	0.57998
12	21.546	MM	0.0964	50.27652	8.69118	0.49698
13	22.142	MF	0.1329	6724.55420	843.11865	66.47129
14	22.257	FM	0.0912	15.24592	2.78716	0.15070

Totals : 1.01165e4 1711.54808

*** End of Report ***

Anexo E. EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS

1) Separación de fases en la reacción de transesterificación



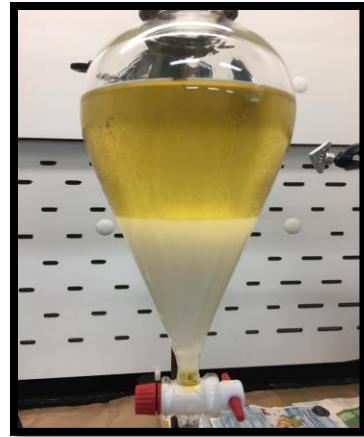
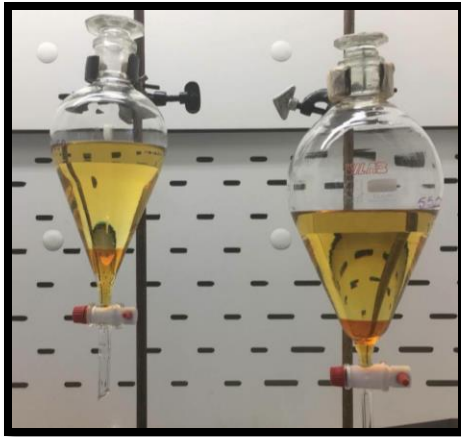
2) Proceso de lavado del biodiesel

Lavado: Agua Acidulada

Lavado: Agua Destilada

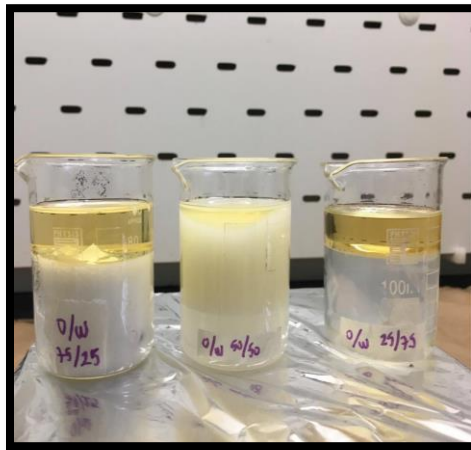


3) Producción del aceite transesterificado de ricino en grandes cantidades



4) Caracterización del aceite transesterificado de ricino

a) Prueba de Miscibilidad



b) Punto de Fluidez



c) Punto de Relampagueo



5) Preparación de las formulaciones



6) Prueba de Reología



7) Prueba de Filtrado API

Filtrado Diesel 85/15



Filtrado Biodiesel 85/15



Filtrado Diesel 80/20



Filtrado Biodiesel 80/20



Filtrado Diesel 75/25



Filtrado Biodiesel 75/25



Anexo F. GRAVEDAD API NORMA ASTM D 287 / API 2544

Este método está basado en el principio de que la gravedad de un líquido varía directamente con la profundidad de inmersión de un cuerpo flotante en el mismo. El cuerpo flotante, en este caso, está graduado en unidades API y se denomina Hidrómetro API. Las gravedades se determinan a 60°F o, se convierten a valores a 60°F aplicando las tablas estándar. Esta propiedad se determina con el siguiente procedimiento:

- 1) Se deberá ajustar la temperatura de la muestra según las condiciones límites y temperatura de prueba especificadas.
- 2) La muestra se transferirá a una probeta limpia evitando la formación de burbujas y removiendo la espuma que se ha formado en la superficie con papel filtro.
- 3) Inspeccione que la temperatura del líquido sea la apropiada y no se haya desviado más de 1°F antes de la observación.
- 4) Deje caer suavemente el hidrómetro dentro del líquido sin que roce las paredes del recipiente y espere el tiempo suficiente para que éste se estabilice y todas las burbujas de aire se vayan a la superficie.
- 5) Realice la lectura observando a la altura del nivel de líquido y reporte.

Anexo G. PUNTO DE FUEGO Y RELAMPAGUEO NORMA ASTM D 92

El método consiste en llenar una copa a un nivel específico con la muestra, removiendo las burbujas de la superficie. Se incrementa rápidamente la temperatura al principio y luego a una tasa baja constante hasta alcanzar el punto de relampagueo. A intervalos específicos se pasa una pequeña flama de prueba sobre la copa, la prueba continúa hasta que la flama cause una combustión sostenida de por lo menos 5 segundos. El procedimiento es descrito a continuación:

- 1) Llene la copa hasta el tope de la línea de llenado removiendo las burbujas de la superficie.
- 2) Encienda la flama de prueba a un diámetro de 3 a 4 mm.
- 3) Caliente la muestra de tal manera que la temperatura aumente de 25°F a 30°F por minuto hasta que esté en 100°F, luego baje dicha tasa a 10°F por minuto hasta alcanzar 50°F menos de la temperatura del punto de relampagueo esperada. A partir de ese punto comience a incrementar la temperatura en 5°F y comience a pasar la flama de prueba por no más de 1 segundo hasta encontrar el punto de relampagueo y registre.
- 4) Para determinar el punto de fuego continúe calentando, esta vez a una tasa de 10°F por minuto aplicando la flama en intervalos de 5°F hasta obtener una combustión sostenida de al menos 5 segundos. Registre dicha temperatura.
- 5) Observe la presión barométrica al momento de la prueba, si ésta difiere en 101,3 kPa (760 mm Hg), se debe aplicar el siguiente factor de corrección:

a) Si el punto de Fuego/ Relampagueo observado se midió en °C y la presión barométrica del ambiente en kPa

$$C = c + 0,25 * (101,3 - p)$$

Donde C= punto de Fuego/ Relampagueo corregido °C, c= punto de Fuego/ Relampagueo medido °C y p= presión barométrica del ambiente, kPa.

b) Si el punto de Fuego/ Relampagueo observado se midió en °C y la presión barométrica del ambiente en mm Hg.

$$C = c + 0,33 * (760 - P)$$

Donde C= punto de Fuego/ Relampagueo corregido °C, c= punto de Fuego/ Relampagueo medido °C y p= presión barométrica del ambiente, mmHg.

c) Si el punto de Fuego/ Relampagueo observado se midió en °F y la presión barométrica del ambiente en mm Hg.

$$C = c + 0,33 * (760 - P)$$

Donde C= punto de Fuego/ Relampagueo corregido °F, c= punto de Fuego/ Relampagueo medido °F y p= presión barométrica del ambiente, mmHg.

Anexo H. VISCOSIDAD SAYBOLT NORMA ASTM D 88

El método consiste en medir el tiempo de flujo para el paso de 60 mL de muestra fluyendo a través de un orificio calibrado en la parte inferior bajo condiciones específicas a condiciones de temperatura entre 70°F y 210°F. Dicho orificio puede ser Furol o Universal, por lo que existe una Viscosidad Furol y otra Universal, siendo la primera una décima parte de la segunda por lo que se recomienda para productos del petróleo tales como aceites combustibles y otros materiales residuales.

Como preparación, el baño de temperatura debe llenarse con aceite térmico un cuarto de pulgada por encima del anillo de desbordamiento del viscosímetro. Dicho baño deberá estabilizarse a la temperatura de prueba con agitación adecuada, por su parte, un volumen de muestra de 100 mL deberá precalentarse hasta alcanzar una temperatura de entre 3°F y 5°F por encima de la temperatura de prueba. Una vez realizado lo anteriormente mencionado, se procede con la prueba de la siguiente manera:

- 1) Utilice un embudo con una malla de 100 mesh para filtrar la muestra preparada agregándola directamente al viscosímetro hasta un nivel superior al anillo de desbordamiento.
- 2) Agite la muestra hasta que su temperatura permanezca constante en la temperatura de prueba por al menos un minuto agitando circularmente a 30 o 50 rpm.
- 3) Succione el exceso de aceite que se encuentra por encima del anillo de desbordamiento entre el anular externo y la pared del viscosímetro.
- 4) Coloque la copa receptora de 60 mL debajo del orificio a utilizar.
- 5) Retire el tapón y simultáneamente accione el cronómetro. Deje transcurrir el tiempo necesario para que el nivel de líquido llegue a la marca de graduación de la copa receptora y registre dicho tiempo.
- 6) Aplique la fórmula que se describe a continuación y halle la viscosidad cinemática.

CONVERSIÓN DE VISCOSIDAD SAYBOLT A VISCOSIDAD CINEMÁTICA			
VISCOSIDAD SAYBOLT	UNIDAD	INTERVALO DE TIEMPO (Seg)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA
Universal	SSU	$32 < t < 100$	$0,00226 * t - \frac{1,95}{t}$
		$100 < t$	$0,00220 * t - \frac{1,35}{t}$
Furol	SSF	$25 < t < 40$	$0,00226 * t - \frac{1,84}{t}$
		$40 < t$	$0,00216 * t - \frac{1,35}{t}$

Anexo I. PUNTO DE FLUIDEZ NORMA ASTM D-97

El método consiste en calentamiento preliminar de la muestra seguido de un enfriamiento a una tasa específica, examinando las características de flujo de la muestra cada 3°C. El procedimiento se describe a continuación:

- 1) Verter el aceite dentro del recipiente de prueba hasta la marca de nivel.
- 2) Cierre el recipiente de la prueba con el corcho y termómetro insertado.
- 3) Para la medición del punto de fluidez someta el aceite al siguiente tratamiento:
 - a) Si el punto de fluidez esperado está por encima de 33°C caliente el aceite sin agitación 9 °C por encima de dicho valor y luego transfiera el recipiente a un baño que esté a 24°C.
 - b) Si el punto de fluidez esperado está por debajo de 33°C caliente el aceite sin agitación a 45 °C y luego transfiera el recipiente a un baño que esté a 6°C.
- 4) Inserte el recipiente de prueba en la cubierta del montaje correctamente instalado, empiece a examinar la apariencia del aceite cada vez que la temperatura del mismo disminuya en 3 °C y ladee el recipiente lo suficiente para determinar si hay algún movimiento de la muestra.
- 5) Registre la temperatura a la cual el recipiente de prueba se coloque en posición horizontal por 5 segundos y no se observe movimiento de la muestra.