

**INFLUENCIA DE LAS VARIABLES TERMOMECAÑICAS Y CONTENIDO DE
AGUA EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DIRECTAS
DE CRUDOS PESADOS**

**KATHERIN CAMACHO ARIAS
SERGIO ANDRÉS PÉREZ FUENTES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

**INFLUENCIA DE LAS VARIABLES TERMOMECAÑICAS Y CONTENIDO DE
AGUA EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DIRECTAS
DE CRUDOS PESADOS**

**KATHERIN CAMACHO ARIAS
SERGIO ANDRÉS PÉREZ FUENTES**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico.**

Director

**ARLEX CHAVES GUERRERO
Ph.D. Ingeniero Químico**

Codirectora

**CLAUDIA ESNEIDEN CUADRADO ARDILA
Ingeniera Química M. Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios por permitirme llegar hasta donde estoy, por haberme hecho nacer en una familia donde se valora el esfuerzo y la dedicación y por darme la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mi madre por ser mi apoyo incondicional, por creer en mí y esforzarse cada día para que yo pudiera tener siempre lo que necesitaba y más, a mi tía por ser mi ejemplo a seguir y por confiarme sus conocimientos, por brindarme su amor y hacerme sentir una hija; y al resto de mi familia gracias por siempre estar ahí para mí.

A mis amigos, por compartir conmigo todo lo que fue esta etapa, con sus altas y sus bajas, porque con ellos la universidad no solo fue mi paso por la academia, sino que fue donde construí momentos que serán inolvidables.

A mi director de proyecto el profesor Arlex Chaves y codirectora Claudia Cuadrado por su dedicación y orientación en lo que fue el último paso en mi formación académica.

A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander y al laboratorio de Fenómenos Interfaciales y Reología del Instituto Colombiano del Petróleo por permitir mi formación como ingeniera química y mi crecimiento integral como persona. A mis docentes y demás involucrados en mi formación académica y personal, gracias.

KATHERIN JULIETH CAMACHO ARIAS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, que en todo momento está conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez.

A mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá, por apoyarme siempre durante toda mi vida y darme la oportunidad de estudiar y convertirme en un profesional.

A mis amigos y personas especiales en mi vida, que han estado ahí para apoyarme en cada momento y me han demostrado que puedo contar con ellos.

Al profesor Jorge García, que fue la persona más influyente durante mi etapa en el colegio y que gracias a él y mis experiencias en el semillero me decidí a estudiar Ingeniería Química.

A la ingeniera Claudia Cuadrado, por todas sus enseñanzas durante mi práctica en la que aprendí y desarrollé gran parte de este proyecto. Sin ella, no habría sido posible.

A mi director, el profesor Arlex Chaves, por su disposición y orientación en el desarrollo de este proyecto.

Y finalmente, quiero agradecer a mi Universidad, a la escuela de Ingeniería Química, a mis profesores y en general, a todas las personas que de una u otra forma han hecho parte de mi proceso de formación.

Gracias a todos.

SERGIO ANDRES PÉREZ FUENTES

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	17
2. METODOLOGÍA	21
2.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	21
2.1.1 Tipo de crudo	21
2.1.2 Velocidad de agitación	21
2.1.3 Contenido de agua en el crudo	21
2.1.4 Temperatura de producción	22
2.2 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LAS EMULSIONES	23
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
3.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	26
3.1.1 Curvas de Flujo para Crudo Chichimene	26
3.1.2 Curvas de Flujo para Crudo Castilla	29
3.1.3 Curvas de Flujo para Crudo Rubiales	30
3.2 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES	32
3.3 INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE AGUA EN LAS EMULSIONES	35
3.3.1 Crudo Chichimene	35
3.3.2 Crudo Castilla	36
3.3.3 Crudo Rubiales	37
3.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES	38

3.5 INFLUENCIA DEL TAMAÑO PROMEDIO DE LAS GOTAS EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES	39
4. CONCLUSIONES	43
5. RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de Emulsione de aceite y agua.	16
Figura 2. Emulsión directa 16027 – 16 vista al microscopio.	17
Figura 3. Bomba electrosumergible (BES)	20
Figura 4. Mecanismo de funcionamiento del Mastersizer s. (Labs, 2014)	24
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso.	25
Figura 6. Comportamiento Reológico del Crudo Chichimene a 45° C.	26
Figura 7. Comportamiento reológico crudo Chichimene a altas velocidades de deformación.	28
Figura 8. Comportamiento Reológico del Crudo Castilla a 45° C.	30
Figura 9. Comportamiento Reológico del Crudo Rubiales a 45° C.	32
Figura 10. Efecto de la velocidad de agitación en la viscosidad del crudo Chichimene.	33
Figura 11. Efecto de la concentración de agua Crudo Chichimene. (Datos 30 s ⁻¹).	36
Figura 12. Efecto de la concentración de agua Crudo Castilla. (Datos 30 s ⁻¹).	37
Figura 13. Efecto de la concentración de agua Crudo Rubiales. (Datos 30 s ⁻¹)	38
Figura 14. Distribución del tamaño de gota con 10% de agua para Crudo Chichimene.	42

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño de experimentos.	22
Tabla 2. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Chichimene.	27
Tabla 3. Índices de comportamiento reológico del crudo Chichimene.	29
Tabla 4. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Castilla.	30
Tabla 5. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Rubiales.	31
Tabla 6. Tamaños de gota promedio.	34
Tabla 7. Comparación del cambio en viscosidad al aumentar de 1800 RPM a 4000 RPM. Datos en Pa·s	34
Tabla 8. Efecto de la concentración de agua en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Chichimene.	39
Tabla 9. Efecto de la temperatura en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Chichimene.	40
Tabla 10. Efecto de la temperatura en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Castilla.	40
Tabla 11. Efecto de la velocidad de producción en el tamaño promedio de las gotas para el crudo Chichimene	41

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Tablas de datos de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación de la velocidad de agitación, contenido de agua y temperatura de producción.	49
Anexo B: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación del contenido de agua presente en las emulsiones.	51
Anexo C: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación del contenido de agua presente en las emulsiones.	55
Anexo D: Tablas de distribución de tamaño de gota. Realizadas 3 réplicas y analizado el promedio	59
Anexo E: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación de la velocidad de deformación.	77
Anexo F: Graficas de distribución de tamaño de gota.	80
Anexo G: Tablas de efecto	85
Anexo H: Índices de comportamiento reológico y esfuerzo.	90
Anexo I: Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias.	103

RESUMEN

TÍTULO: INFLUENCIA DE LAS VARIABLES TERMOMECAÑICAS Y CONTENIDO DE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DIRECTAS DE CRUDOS PESADOS*

AUTORES: PÉREZ FUENTES SERGIO ANDRÉS
CAMACHO ARIAS KATHERIN JULIETH**

PALABRAS CLAVE: Crudos pesados, emulsiones directas, viscosidad, tamaño de gota, temperatura, velocidad de agitación, contenido de agua.

DESCRIPCIÓN:

Una emulsión de crudo consiste en una mezcla heterogénea de crudo y agua o viceversa; para el caso de las emulsiones directas de crudos pesados, el agua se dispersa en el crudo en forma de pequeñas gotas de diferente forma y tamaño que influyen directamente en el comportamiento reológico de la emulsión al igual que la velocidad a la que sean preparadas, la temperatura y finalmente la cantidad de agua. Específicamente es su viscosidad la que se ve directamente afectada por el cambio en cualquiera de estas variables siendo esta la de mayor.

En este trabajo de investigación se prepararon 36 emulsiones con diferentes contenidos de agua provenientes de 3 crudos (Chichimene, Castilla y Rubiales) de diferente gravedad API para abarcar la mayoría de los crudos pesados existentes en Colombia, que fueron analizadas en el Instituto Colombiano del Petróleo. Se verificó la distribución del tamaño de gota, se evaluó la variación de la viscosidad en las emulsiones a diferentes velocidades de deformación y finalmente se analizó el efecto de la temperatura medida con un termómetro y estabilizada en un baño.

Después de realizar todo el proceso de preparación y mezclado, se midieron y analizaron las diferentes variaciones presentadas de las cuales se obtuvieron graficas concluyentes, que fueron analizadas a la luz de otras investigaciones previamente encontradas en el laboratorio de Fenómenos Interfaciales y Reología y de literatura relevante en el estudio de emulsiones directas e inversas a base de crudo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Arlex Chaves Guerrero PhD. Codirectora Ing. Claudia Cuadrado Ardila M. Sc.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL VARIABLES AND WATER CONTENT ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR IN DIRECT EMULSIONS OF HEAVY CRUDE OIL.*

AUTHORS: PÉREZ FUENTES SERGIO ANDRÉS
CAMACHO ARIAS KATHERIN JULIETH**

KEYWORDS: heavy oil, emulsions, direct emulsions, viscosity, droplet size, temperature, stirring speed, water content or water cut.

DESCRIPTION:

A crude emulsion is a heterogeneous mixture of oil and water or vice versa; for the case of direct emulsions of heavy crude, water dispersed in the oil as droplets different shape and size that directly influence the rheological behavior of the emulsion as the rate at which they are prepared, the temperature and finally the amount of water. Specifically, is its viscosity which is directly affected by the change in any of these variables being the highest.

In this research 36 emulsions were prepared with different water contents from 3 raw (Chichimene, Castilla and Rubiales) different API gravity cover most existing heavy crude in Colombia, which were analyzed in the Colombian Petroleum Institute. the droplet size distribution was verified, the variation of viscosity in emulsions at different shear rates was evaluated and finally the effect of the temperature measured with a thermometer was analyzed and stabilized in a bath.

After making the entire process of preparation and mixing they were measured and analyzed the different variations presented which were obtained graphic conclusive, which were analyzed in the light of other studies previously found and analyzed in the laboratory of Interfacial Phenomena and Rheology and relevant literature in the study of direct and inverse oil-based emulsions.

* Degree work

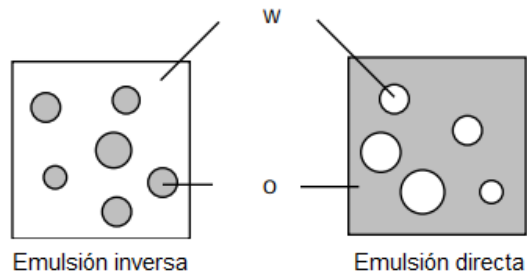
** Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Advisor Arlex Chaves Guerrero PhD. Co-Advisor Claudia Cuadrado Ardila M. Sc.

INTRODUCCIÓN

Los crudos pesados son aquellos que poseen una densidad mayor a los 900 kg/m³ (Melorose, Perroy, & Careas, 2015) debido a su alta concentración de asfáltenos, parafinas y resinas. Estos crudos se caracterizan por tener una viscosidad muy elevada, lo que los hace difíciles y caros de producir y refinar. Sin embargo, a nivel mundial, aproximadamente el 40% (Felix et al., 2006) de los recursos de petróleo corresponden a este tipo de crudos; por lo tanto, se han convertido en un gran reto tecnológico para los ingenieros del presente en cuanto a la búsqueda de alternativas que permitan el fácil manejo de los mismos. En Colombia, los crudos pesados representan actualmente un poco más de la mitad de la producción de petróleo del país (Langer, 2015); y, con la situación económica actual y la disminución de las reservas de los yacimientos convencionales, la atención de la industria está centrada en el estudio de este tipo de crudos con el fin de reducir los costos de producción, transporte y refinación.

En las operaciones de extracción del petróleo, debido a la agitación (ocasionada en gran parte por bombas) que se da durante el levantamiento y el transporte en superficie, el agua de formación se dispersa dentro del crudo y se producen emulsiones (Marfisi & Salager, 2004). Según la literatura, una emulsión directa corresponde a un aceite disperso en agua, mientras que en una inversa ocurre lo contrario, es decir, el aceite es la fase continua y el agua es la fase dispersa (Melorose et al., 2015). Sin embargo, para el estudio específico de la industria del petróleo se maneja una nomenclatura contraria, es decir, las emulsiones directas son aquellas donde el agua se encuentra como fase dispersa en la matriz de crudo, siendo este la fase continua (Marfisi & Salager, 2004). La Figura 1 explica esta situación.

Figura 1. Tipos de Emulsione de aceite y agua.



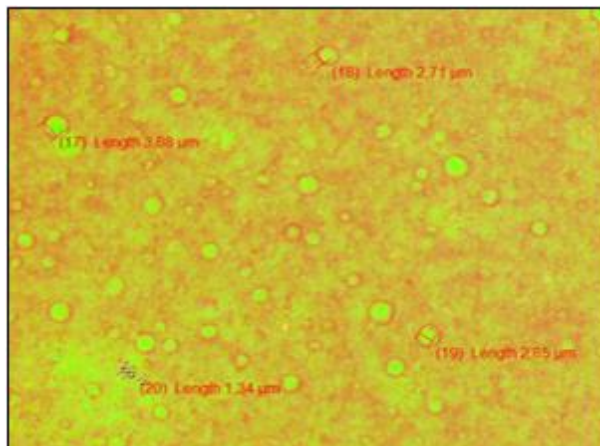
La formación de estas emulsiones directas genera diferentes tipos de problemas debido a que ocasionan un aumento en la viscosidad, que varía dependiendo de la concentración de agua que se logró acumular en la matriz del crudo. Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento reológico de este tipo de emulsiones y cómo influyen factores como la temperatura, la velocidad de agitación o el tamaño de las gotas en el mismo. Por esta razón, en el laboratorio de Fenómenos Interfaciales & Reología del Instituto Colombiano del Petróleo, se han realizado estudios del comportamiento reológico de estas emulsiones; no obstante, estos estudios se han enfocado en emulsiones con contenidos de agua por encima del 30%. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto de investigación es estudiar y determinar cómo influyen la velocidad de agitación, la temperatura y el tamaño de las gotas en el comportamiento reológico de las emulsiones directas de crudos pesados colombianos para concentraciones de agua menores al 30%.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Una emulsión es un sistema constituido por dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales se dispersa en la otra en forma de gotas muy pequeñas donde las gotas representan la fase dispersa dando lugar a una fase continua que es donde se mueven las gotas, así como se evidencia en la Figura 2, donde se observa pequeñas gotas de agua (en este caso fase dispersa) en una matriz de crudo (fase continua).

Las emulsiones suelen dividirse en dos grupos determinado en la industria petrolera de la siguiente manera: si se habla de crudo disuelto en agua, es decir el agua como fase continua, se está refiriendo a emulsiones inversas; mientras que si se habla de agua disuelta en crudo siendo este la fase continua se refiere a emulsiones directas, que son las que van a ser estudiadas en este proyecto, debido al poco conocimiento en el comportamiento obtenido hasta hoy en este tipo de emulsiones.

Figura 2. Emulsión directa 16027 – 16 vista al microscopio.



Las emulsiones son preparadas mediante agitación y estabilizadas por algunos compuestos presentes en el aceite como lo son los asfáltenos, resinas, fenoles, cresoles, ácidos orgánicos entre otros; las gotas quedan aisladas entre sí tanto física como eléctricamente. De la naturaleza de esta película rígida o elástica, depende la estabilidad de la emulsión. Esta película es el resultado de la adsorción de los agentes químicos emulsificantes polares de alto peso molecular (generalmente asfáltenos).

Para una correcta emulsificación del crudo ya sea inversa o directa se debe conocer su formulación (parámetros de composición) y una adecuada agitación a una velocidad específica. Esta velocidad influirá notablemente en la calidad de la emulsión ya que el tamaño y distribución de las partículas afectan sus propiedades reológicas y la estabilidad de la misma. Para garantizar la correcta agitación es necesario tener en cuenta factores como el tipo de impulsor y el número de revoluciones al que este trabaje, la geometría del recipiente, el tipo de régimen y los patrones de flujo generados (García Chinchilla, 2003), para lo cual se definieron equipos simuladores de los equipos reales encontrados en pozos petroleros activos.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la temperatura de producción de las emulsiones, pues como es bien conocido al incrementar la temperatura se reduce la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial.

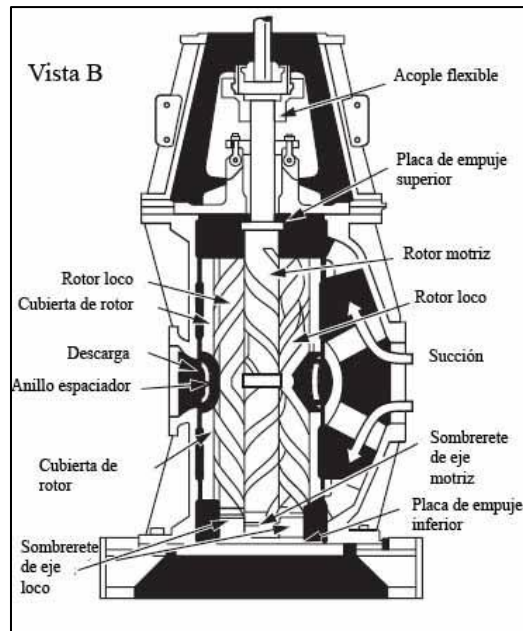
De acuerdo a Morales Corozo, en su tesis enfocada en crudos pesados presentes en el Ecuador, con el aumento en los estudios de extracción se hace más rentable el tratamiento y utilización de crudos con densidades API por debajo de 20°. Con base a esos estudios, encontró que la viscosidad de las emulsiones corresponde a viscosidades mayores a las que tendrían los crudos utilizados a temperaturas de 50°C. Además, tienen un comportamiento pseudoplástico que tiende a ser

Newtoniano a medida que aumenta la temperatura (Morales Corozo, 2014). En razón a que los crudos estudiados contaban con características similares a los nuestros, fueron estudiados y analizados bajo condiciones análogas.

A continuación, presentaremos el proceso mediante el cual se obtienen emulsiones directas ya que es durante este proceso en que se forman estas emulsiones y lo que le da importancia a conocer el comportamiento de dichas emulsiones:

- Se hace la búsqueda y reconocimiento de un pozo y además se determina si existe suficiente petróleo como para que sea rentable la extracción perforando lentamente el suelo y a la vez colocando tubos por donde posteriormente será conducido el crudo hasta la superficie (Jimeno, Burgos, & Fernández, 2002).
- Una vez se ha abierto el pozo, se procede a instalar máquinas de bombeo elegidas dependiendo del tipo de crudo que se busque extraer y de la profundidad del pozo. Una de las bombas particularmente usadas son las bombas de tornillo las cuales constan de un tornillo tipo sin fin ubicado al interior de una carcasa. El líquido entra en el puerto de succión y cubre los tornillos hasta los filetes de las roscas, los cuales arrastran el líquido dentro de la bomba hacia el puerto de descarga. La bomba de tornillo tiene ciertas desventajas que son principalmente la baja eficiencia y el alto costo; sin embargo, es conveniente para altas presiones encontradas en algunos pozos petroleros hasta 3000 psi.

Figura 3. Bomba electrosumergible (BES)



Para tener una mejor eficiencia y desplazar grandes volúmenes de crudo a bajo costo, se usa una bomba electro sumergible (BES) (Ilustración 3), que es un sistema de levantamiento artificial en pozos profundos (entre los 12000 y los 15000 ft), con el objeto de manejar altas tasas de flujo, la cual consiste en la utilización de bombas centrífugas de múltiples etapas ubicadas en el fondo del pozo, accionadas por motores eléctricos (Da Silva, 2009).

2. METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos de este proyecto de investigación se hizo de manera que, al realizar unos cambios propuestos en las variables de entrada establecidas, fuera posible observar e identificar las causas de los mismos en las variables respuesta o de salida. Las variables de entrada o factores establecidos para este estudio fueron: el tipo de crudo a analizar, la velocidad de agitación en la formulación de las emulsiones, el contenido neto de agua y la temperatura de producción.

2.1.1 Tipo de crudo: En este estudio, como ya se mencionó anteriormente, se utilizaron tres crudos diferentes: el crudo Chichimene, el crudo Castilla y el crudo Rubiales. Estos se escogieron porque representan en su gran mayoría, a los crudos pesados y extra pesados existentes en Colombia.

2.1.2 Velocidad de agitación: Para este factor se consideraron dos niveles, 1800 y 4000 RPM. Se escogieron estas velocidades con el fin de simular el efecto que tendrían una bomba de tornillo, que son las que generalmente se tienen en superficie, y una BES (Bomba electro-sumergible) que es una bomba de alto torque utilizada en campos donde se tienen crudos pesados y extra pesados.

2.1.3 Contenido de agua en el crudo: Para este factor se consideraron 3 niveles, 10%, 20% y 30% de agua. Se establecieron estos valores debido a que representan zonas grises en los estudios que se han hecho acerca de este tema; las emulsiones con cortes de agua superiores al 30% ya han sido plenamente

estudiadas en el laboratorio de Fenómenos Interfaciales & Reología del Instituto Colombiano del Petróleo.

2.1.4 Temperatura de producción: Para este factor se consideraron dos niveles, 45°C y 60°C. Estas dos temperaturas representan en gran parte la mayoría de los campos de crudos pesados de Colombia. (ECOPETROL, 2014)

Al tener dos factores de tres niveles y dos factores de solo dos niveles, se obtienen las siguientes combinaciones:

$$3^2 * 2^2 = 9 * 4 = 36 \text{ experimentos}$$

De manera que para cumplir los objetivos de este proyecto fue necesario realizar 36 experimentos organizados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Diseño de experimentos.

Emulsiones			%H ₂ O	RPM	T _p [°C]
Chichimene	Castilla	Rubiales			
16027-1	16027-13	16027-25	10%	1800	45
16027-2	16027-14	16027-26	10%	1800	60
16027-3	16027-15	16027-27	10%	4000	45
16027-4	16027-16	16027-28	10%	4000	60
16027-5	16027-17	16027-29	20%	1800	45
16027-6	16027-18	16027-30	20%	1800	60
16027-7	16027-19	16027-31	20%	4000	45
16027-8	16027-20	16027-32	20%	4000	60
16027-9	16027-21	16027-33	30%	1800	45
16027-10	16027-22	16027-34	30%	1800	60
16027-11	16027-23	16027-35	30%	4000	45
16027-12	16027-24	16027-36	30%	4000	60

Los códigos (16027-1 al 16027-36) que se muestran en la tabla corresponden a la nomenclatura interna de las emulsiones en el laboratorio de Fenómenos Interfaciales & Reología del instituto colombiano de petróleo.

2.2 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LAS EMULSIONES

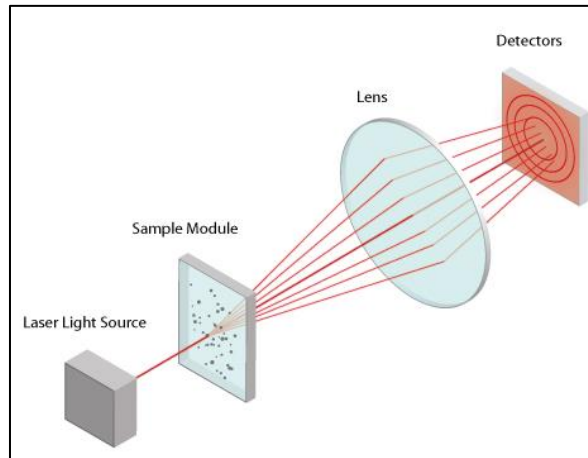
Para preparar las emulsiones que se caracterizaron, se siguió la metodología descrita en el tomo I del manual de procedimientos técnicos del laboratorio de Fenómenos Interfaciales & Reología.

El primer paso consiste en calcular la cantidad de crudo y agua necesarios para producir 300 g de cada emulsión. Luego se procedió a pesar las cantidades correspondientes en una balanza de alta precisión «Sartorius AG Göttingen». Utilizando un vaso de precipitados, se calentaron el crudo y el agua (por separado) en un baño termostático «Haake E8» a 45°C o 60°C según la emulsión a preparar; cuando el baño alcanzó la temperatura programada, se dejaron durante 15 minutos más con el fin de homogenizar la temperatura en toda la matriz del crudo. En este punto se ponen en contacto el aspa de un agitador «Lightnin Labmaster» con el crudo y se programa la velocidad de agitación correspondiente (1800 RPM o 600 RPM). Utilizando una jeringa, se agregó el agua al crudo muy lentamente con el fin de que no se acumulara una capa de agua sobre el crudo y que después, esta no pudiera entrar en la matriz. Finalizado este paso, para las emulsiones preparadas a 1800 RPM, se dejó agitar durante 5 minutos más; mientras que, para las que se prepararon a 600 RPM, una vez se incorporó toda el agua en el crudo fueron llevadas a un agitador de alto torque denominado «Ultra-Turrax T50 Basic» y se agitaron a 4000 RPM durante dos minutos. Finalmente, se tomaron muestras para evaluar el comportamiento reológico en un viscosímetro «Haake VT550» y la distribución del tamaño de las gotas en un sistema óptico denominado «Mastersizer S».

El «Mastersizer S» es un sistema óptico, flexible y modular, pero totalmente integrado, que permite determinar el tamaño y la distribución de partículas basado en la difracción de un láser; con un rendimiento de medición segura entre 0.05 y 900 micrómetros (Britanija, 2008).

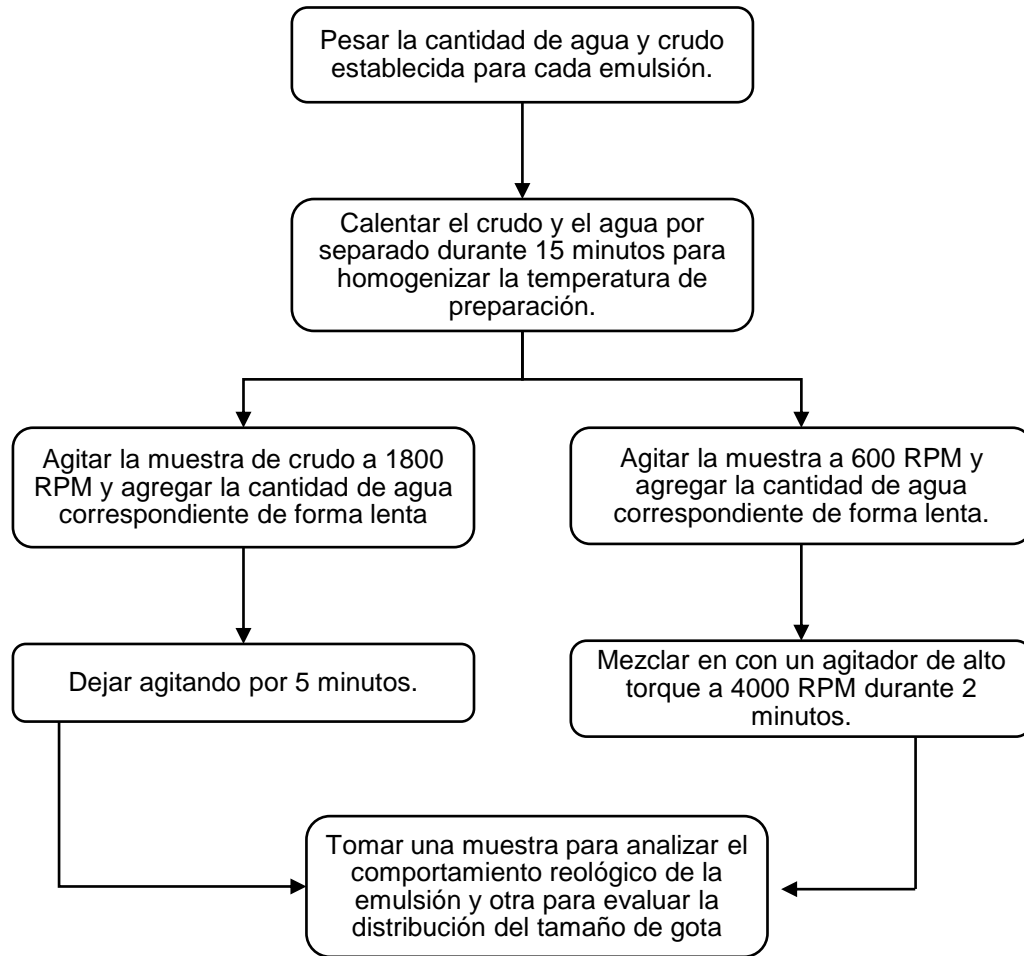
Las muestras pueden ser analizadas en una suspensión líquida o en una base de dispersión seca. A través de la celda donde se encuentra la muestra se hace pasar un haz de luz que se dispersa en una amplia gama de ángulos; los detectores del sistema (ubicados en ángulos fijos) miden la intensidad de la luz dispersada en esa posición. A continuación, se aplica un modelo matemático (Mie o Fraunhofer) con el fin de generar una distribución del tamaño de partícula (Labs, 2014).

Figura 4. Mecanismo de funcionamiento del Mastersizer s. (Labs, 2014)



La siguiente figura describe los pasos realizados en la preparación de las emulsiones:

Figura 5. Diagrama de flujo del proceso.



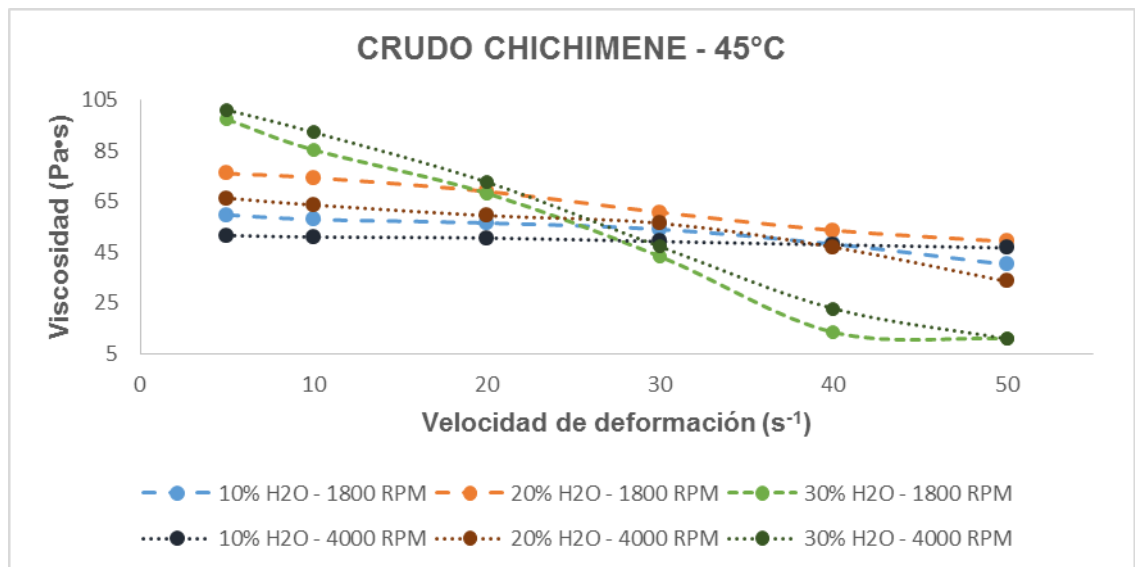
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

Al evaluar los datos de viscosidad obtenidos para cada uno de los crudos, se encontraron algunas diferencias relevantes entre ellos. A continuación, se presentan gráficas de como varía la viscosidad respecto a la velocidad de deformación para los tres crudos hasta 50 s^{-1} y un análisis de estos comportamientos.

3.1.1 Curvas de Flujo para Crudo Chichimene: Como se puede observar en la Figura 6, el crudo Chichimene presenta un comportamiento pseudoplástico, es decir, a medida que aumenta el esfuerzo de corte, disminuye la viscosidad; sobre todo a 45°C .

Figura 6. Comportamiento Reológico del Crudo Chichimene a 45°C .



Para realizar el análisis del comportamiento reológico se utilizó el modelo de la ley de potencias, este es un modelo de dos parámetros que describe bien el comportamiento pseudoplástico ($n < 1$) o dilatante ($n > 1$) a magnitudes de velocidad de deformación intermedia. La relación entre la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

Donde K es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento.

Como se puede ver la Tabla 2, hay dos emulsiones (16027-09 y 16027-11) para las cuales el índice de comportamiento es negativo, y otra (16027-10) para la cual el índice de comportamiento es muy bajo en comparación con las demás. Esto se debe a que los datos de esfuerzo no se ajustan al modelo de la ley de potencias utilizado, lo que se evidencia en los valores de R^2 en la tabla 2.

Así como con los valores de viscosidad, los valores de esfuerzo también se ven afectados por la inversión de fases de la emulsión, lo que provoca que aumenten y disminuyan drásticamente a medida que aumenta la velocidad de deformación. Estas fluctuaciones provocan que estas emulsiones no se puedan ajustar al modelo de la ley de potencias.

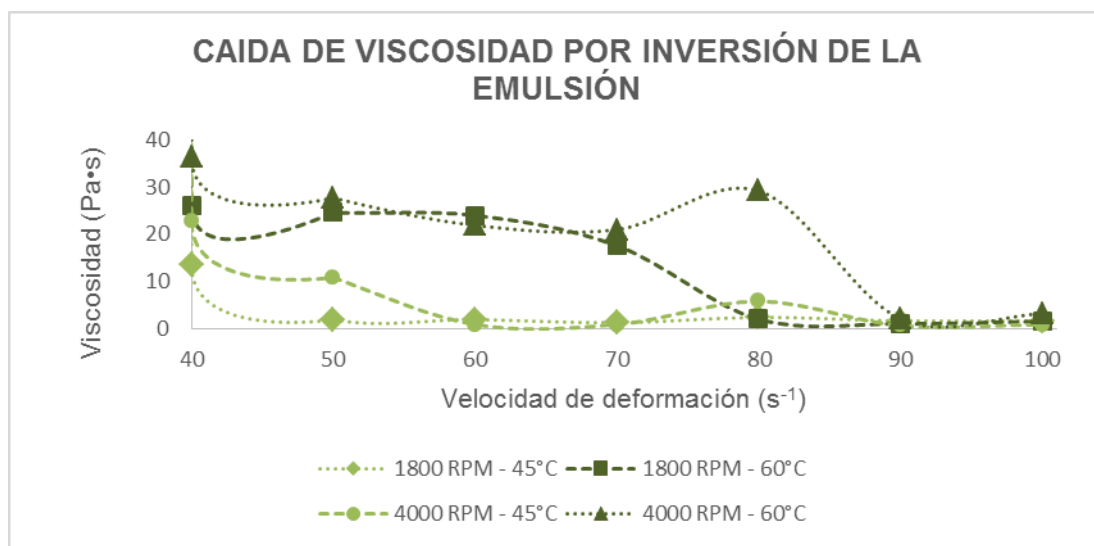
Tabla 2. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Chichimene.

Crudo Chichimene - 45 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R^2)
16027-01	0.83	90.12	0.9859
16027-02	0.94	46.56	0.9988
16027-03	0.93	62.55	0.9993
16027-04	0.94	60.9	0.9965

Crudo Chichimene - 45 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R ²)
16027-05	0.82	113.69	0.9935
16027-06	0.76	115.54	0.9862
16027-07	0.73	122.22	0.9593
16027-08	0.72	139.03	0.9692
16027-09	-0.39	1894.56	0.1324
16027-10	0.31	319.41	0.6321
16027-11	-0.42	2280.59	0.0865
16027-12	0.71	105.19	0.9560

Sin embargo, para las emulsiones con un contenido de agua del 30%, se puede observar una caída considerable en la viscosidad cuando se aumenta la velocidad de deformación. Este comportamiento se debe a que el punto de inversión para el crudo Chichimene se encuentra cercano al 30%; es decir, a un valor de velocidad de deformación crítica, el agua pasa a ser la fase externa por momentos y produce cambios bruscos en el valor de viscosidad a altas velocidades de deformación (Torres Ome, 2013). Esto se puede apreciar mejor en la Figura 7.

Figura 7. Comportamiento reológico crudo Chichimene a altas velocidades de deformación.



Por otra parte, al aumentar la temperatura de medición de 45°C a 60°C y a medida que aumenta la velocidad de deformación, además de una reducción en la viscosidad de las emulsiones, se observa que estas tienden a tener un comportamiento Newtoniano (hasta 50 s⁻¹). En la Tabla 3, se puede encontrar una comparación de los índices de comportamiento de la ley de potencias para este crudo a 45°C y a 60°C.

Tabla 3. Índices de comportamiento reológico del crudo Chichimene.

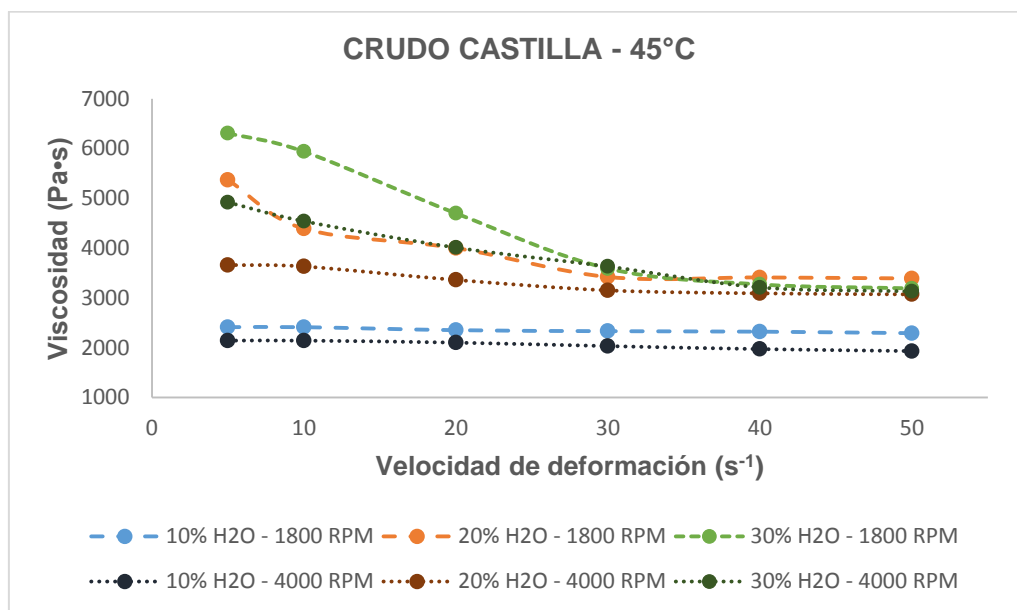
Índices de comportamiento Crudo Chichimene		
	45°C	60°C
16027-1	0.83	0.92
16027-2	0.94	0.97
16027-3	0.93	0.97
16027-4	0.94	0.96
16027-5	0.82	0.95
16027-6	0.76	0.99
16027-7	0.73	0.94
16027-8	0.72	1.00
16027-9	-0.39	0.89
16027-10	0.31	0.83
16027-11	-0.42	0.87
16027-12	0.71	0.82

3.1.2 Curvas de Flujo para Crudo Castilla: Las emulsiones preparadas con el crudo Castilla, también tienden a ser pseudoplásticas, sobre todo las que tienen un alto contenido de agua, como demuestran los índices de comportamiento presentados en la Tabla 4, pero en menor medida que el crudo Chichimene. En la Figura 8 se observa que a medida que aumenta la velocidad de deformación, el comportamiento reológico tiende a ser Newtoniano para estas emulsiones. Además, un análisis de los datos obtenidos a 60°C para estas emulsiones, deja ver que presentan un comportamiento aún más Newtoniano que las preparadas a 60°C a partir del Crudo Chichimene.

Tabla 4. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Castilla.

Crudo Castilla - 45 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R ²)
16027-13	0.95	2.84	1.0000
16027-14	0.93	2.84	1.0000
16027-15	0.92	2.69	0.9998
16027-16	0.96	2.38	0.9998
16027-17	0.80	7.73	0.9976
16027-18	0.92	2.95	1.0000
16027-19	0.89	4.79	0.9997
16027-20	0.89	4.07	0.9969
16027-21	0.97	6.18	0.9956
16027-22	0.93	2.60	0.9999
16027-23	0.89	6.43	1.0000
16027-24	0.86	7.83	0.9992

Figura 8. Comportamiento Reológico del Crudo Castilla a 45° C.



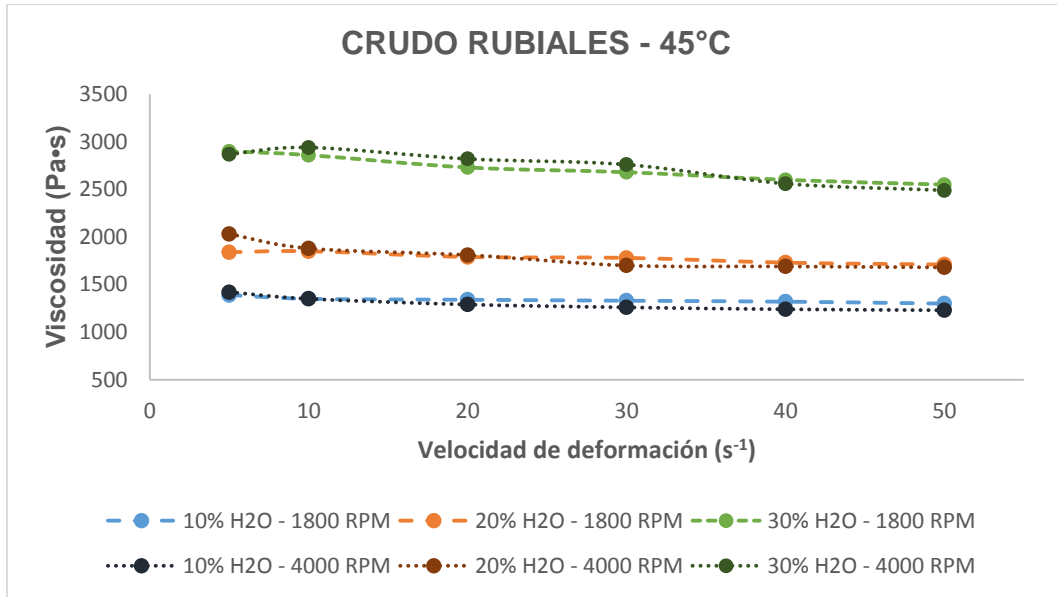
3.1.3 Curvas de Flujo para Crudo Rubiales: Las emulsiones preparadas con este crudo son las que presentan mayor tendencia a comportarse como un fluido

Newtoniano, como se evidencia en la Tabla 5 de los índices de comportamiento, independientemente de si son analizadas a 45°C o 60°C. En la figura 5 se observa además que para este crudo no hay una diferencia marcada en los valores de la viscosidad entre las emulsiones que fueron preparadas a 1800 RPM y las que fueron preparadas a 4000 RPM.

Tabla 5. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Rubiales.

Crudo Rubiales - 45 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R ²)
16027-25	1.41	0.97	0.9997
16027-26	1.23	0.98	0.9999
16027-27	1.72	0.93	1.0000
16027-28	1.01	1.05	0.9999
16027-29	0.95	2.15	0.9999
16027-30	0.96	1.85	1.0000
16027-31	0.90	2.53	0.9996
16027-32	1.01	1.41	0.9997
16027-33	0.93	3.51	0.9999
16027-34	0.97	1.82	0.9999
16027-35	0.91	3.72	0.9987
16027-36	0.99	2.35	0.9995

Figura 9. Comportamiento Reológico del Crudo Rubiales a 45° C.

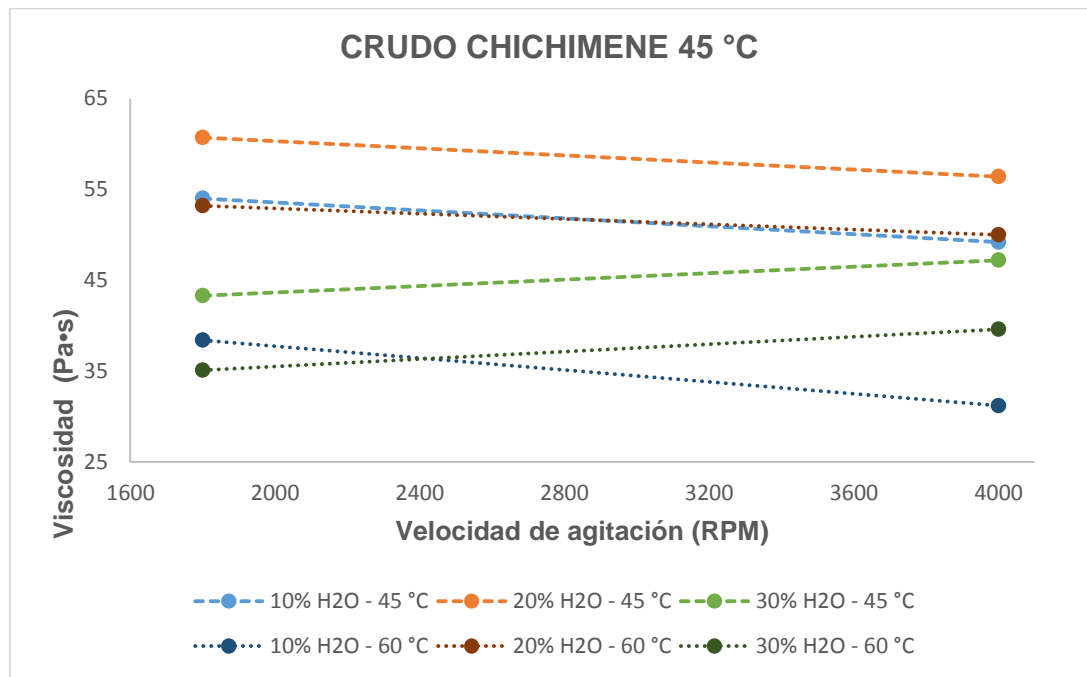


En general, como ya habían mostrado otros autores en estudios anteriores, se observa que la viscosidad aumenta con el contenido de agua de las emulsiones y disminuye con el aumento de la temperatura, independientemente del tipo de crudo (Farah, Oliveira, Navaes, & Rajagopal, 2005). Además, para los datos obtenidos a 60°C, las emulsiones presentan una tendencia marcada a comportarse como fluidos newtonianos (Sandoval, Cañas, & Martínez, 2014).

3.2 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES

La velocidad de agitación influyó de la misma manera en todas las emulsiones independientemente del tipo de crudo utilizado para prepararlas. En la figura 6 se puede observar que para las emulsiones con un contenido de agua del 10% y del 20%, la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de agitación durante la preparación de las emulsiones; mientras que, para las emulsiones con un contenido de agua del 30%, la viscosidad aumenta.

Figura 10. Efecto de la velocidad de agitación en la viscosidad del crudo Chichimene.



Según la literatura, se esperaría que un aumento en la velocidad de agitación (Fernández Arteaga, 2006), produjera una disminución del tamaño de las gotas de agua dentro del crudo y, por lo tanto, aumentara su viscosidad (Farah et al., 2005). Sin embargo, esto no sucede así para la mayoría de las emulsiones preparadas. Esto puede deberse al tipo de crudos utilizados en este estudio, que al ser pesados (Crudos Castilla y Rubiales) y extrapesados (Crudo Chichimene), no permiten que las gotas de agua puedan moverse libremente grandes distancias. Entonces, en este tipo de crudos (pesados y extrapesados), las altas velocidades de agitación en vez de fraccionarlas, lo que hacen es mover lentamente unas gotas hacia otras haciendo que se presente un fenómeno de coalescencia y disminuya la viscosidad en la emulsión. Esta explicación se basa en el análisis de los tamaños de gota promedio, que aumentan al aumentar la velocidad de agitación para las emulsiones con un contenido de agua del 10% y del 20% y disminuyen para las emulsiones con un 30% de agua para los tres crudos.

Tabla 6. Tamaños de gota promedio.

TAMAÑO DE PARTICULA PROMEDIO					
CRUDO CHICHIMENE		CRUDO CASTILLA		CRUDO RUBIALES	
CÓDIGO	TAMAÑO PROM (µm)	CODIGO	TAMAÑO PROM (µm)	CODIGO	TAMAÑO PROM (µm)
16027-01	2.1	16027-13	9.44	16027-25	3.85
16027-02	2.99	16027-14	18.35	16027-26	4.26
16027-03	2.88	16027-15	4.53	16027-27	3.09
16027-04	4.12	16027-16	5.14	16027-28	3.2
16027-05	3.38	16027-17	12.45	16027-29	5.89
16027-06	4.24	16027-18	27.7	16027-30	6.92
16027-07	5.74	16027-19	5.2	16027-31	4.22
16027-08	5.67	16027-20	7.67	16027-32	4.221
16027-09	6.38	16027-21	13.77	16027-33	6.23
16027-10	7.44	16027-22	33.77	16027-34	7.19
16027-11	7.5	16027-23	5.79	16027-35	5.53
16027-12	6.33	16027-24	10.21	16027-36	4.42

Es importante destacar que a pesar de que todas las emulsiones presentaron la misma tendencia con respecto al efecto de la velocidad de agitación, a medida que se evaluaba de un crudo de menor gravedad API a uno de mayor gravedad API, disminuía la diferencia en la caída o aumento de la viscosidad. Por esta razón se presenta la tabla 3, donde se puede observar una comparación de la reducción o el aumento de la viscosidad (dependiendo del contenido neto de agua) para las emulsiones de los tres crudos. Los valores negativos en la tabla hacen referencia a una disminución en la viscosidad de las emulsiones.

Tabla 7. Comparación del cambio en viscosidad al aumentar de 1800 RPM a 4000 RPM. Datos en Pa·s

	Chichimene	Castilla	Rubiales
10% - 45°C	-4,80	-0,27	-0,07
20% - 45°C	-4,30	-0,27	-0,08
30% - 45°C	3,90	0,04	0,08
10% - 60°C	-7,20	-0,21	-0,07

	Chichimene	Castilla	Rubiales
20% - 60°C	-3,20	-0,17	-0,11
30% - 60°C	4,50	0,21	0,15

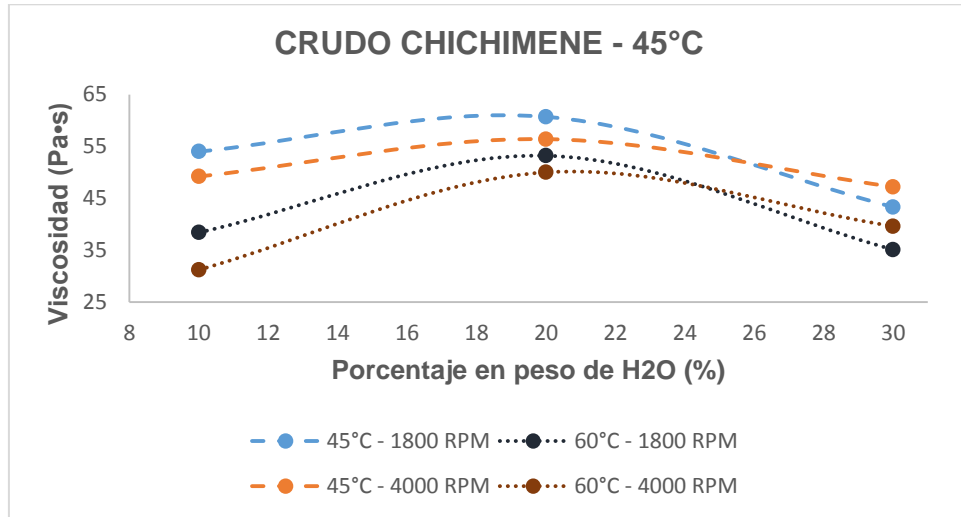
3.3 INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE AGUA EN LAS EMULSIONES

La concentración de agua es un factor determinante que influye de manera significativa en la viscosidad de las emulsiones y en la distribución del tamaño de las gotas; un aumento en el contenido de agua de la emulsión hace que las gotas sean más grandes y además, genera un incremento en la viscosidad de la emulsión (García Chinchilla, 2003). Por otra parte, en este estudio se encontró que entre más baja sea la gravedad API del crudo, este puede almacenar una menor cantidad de agua y por lo tanto, tendrá un punto de inversión más bajo (Fernández Arteaga, 2006). Esto también se ha visto en otros trabajos realizados en el laboratorio de Fenómenos Interfaciales & Reología del Instituto Colombiano del Petróleo. A continuación, se analizan los resultados obtenidos para cada tipo de crudo.

3.3.1 Crudo Chichimene: Según los datos obtenidos para el crudo Chichimene, al aumentar la concentración de agua del 10% al 20% aumenta la viscosidad, mientras que al pasar del 20% al 30%, disminuye.

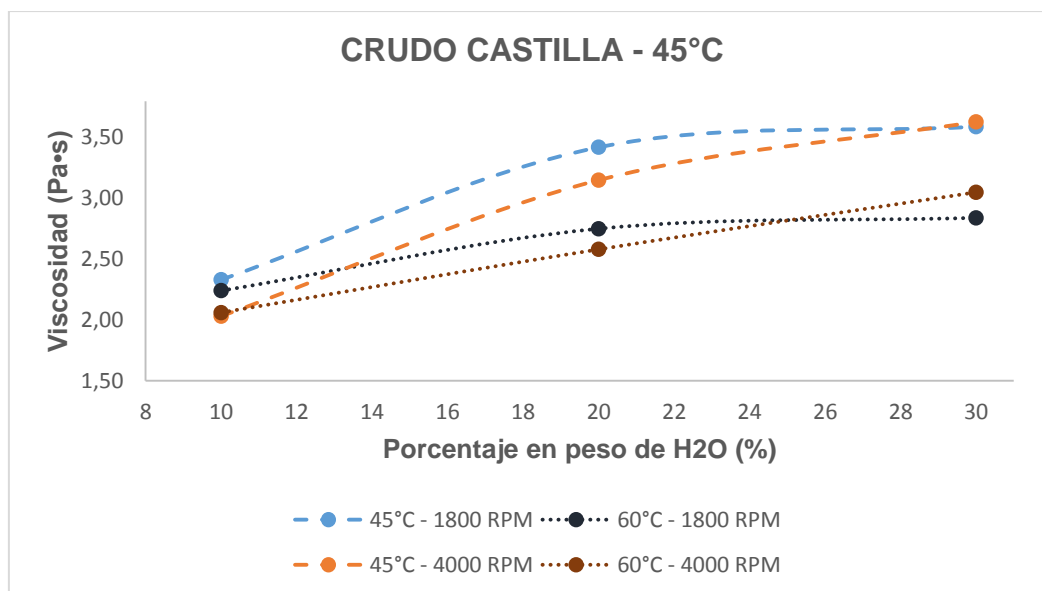
Esto se puede observar en la Figura 11 y se debe a que el crudo Chichimene al ser extra pesado posee una alta tensión superficial que dificulta la entrada de agua a la matriz del crudo y le confiere una menor capacidad de almacenamiento (Oyarvide & Udeos, 2010). Esta disminución en la viscosidad que se da entre las concentraciones de 20% y 30%, indica que en este rango se encuentra el punto de inversión para este crudo como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Efecto de la concentración de agua Crudo Chichimene. (Datos 30 s^{-1}).



3.3.2 Crudo Castilla: Para el crudo Castilla, se observó un incremento de la viscosidad al subir la concentración de agua en las emulsiones. Sin embargo, como se ve en la Figura 12, el incremento en la viscosidad disminuye a medida que la cantidad de agua en la emulsión aumenta. Esto puede significar que la cantidad máxima de agua que puede almacenar el crudo Castilla sin que haya una inversión de fases en la emulsión no se encuentra muy lejos del 30%.

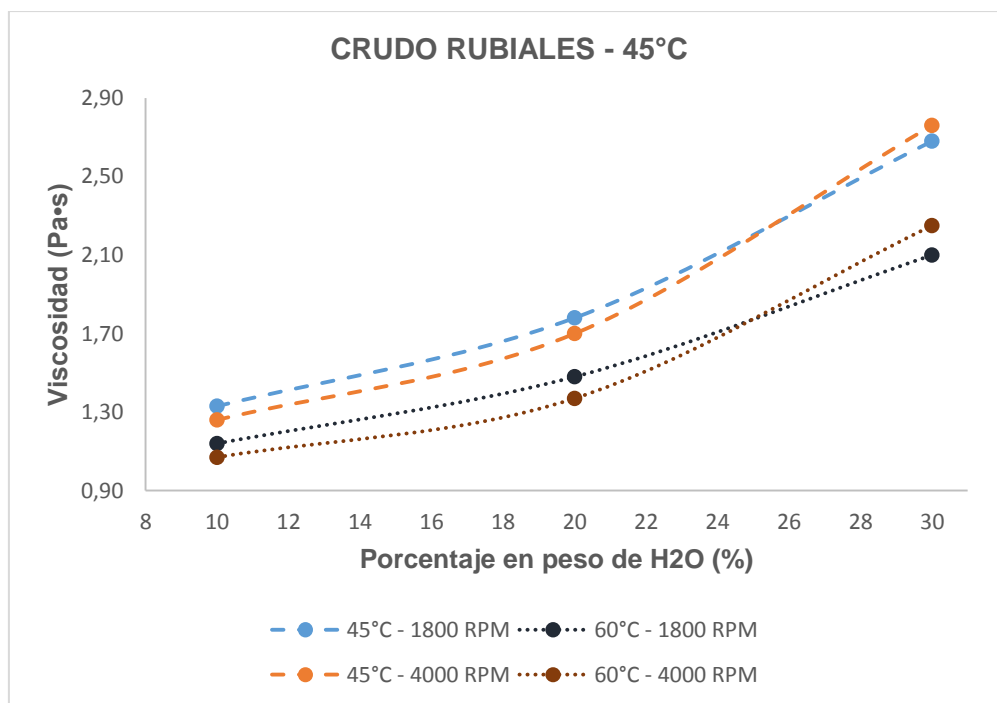
Figura 12. Efecto de la concentración de agua Crudo Castilla. (Datos 30 s^{-1}).



3.3.3 Crudo Rubiales: De acuerdo con los datos obtenidos para el crudo Rubiales, la viscosidad aumenta a medida que sube la concentración de agua en las emulsiones, tal y como se esperaría de acuerdo con la literatura consultada (Sandoval et al., 2014).

En la Figura 13 se ve que las curvas de este crudo se comportan de forma diferente a lo que se encontró en las emulsiones de los crudos Chichimene y Castilla. Esto se debe principalmente a que el crudo Rubiales tiene una mayor gravedad API que los crudos Castilla y Chichimene; por lo tanto, según se expuso al inicio del análisis de la influencia de la concentración de agua, su punto de inversión se encontraría por encima del 30%.

Figura 13. Efecto de la concentración de agua Crudo Rubiales. (Datos 30 s⁻¹)



Para los tres crudos, solo se mostraron las gráficas a 45°C ya que las emulsiones que fueron preparadas a 60°C, presentaron la misma tendencia (Anexo C).

3.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES

La temperatura de producción influye en los tres crudos de la misma manera, disminuyendo la viscosidad de las emulsiones. Este efecto se puede apreciar en las figuras 7, 8 y 9; donde las curvas que representan las emulsiones preparadas a 45°C están por encima de aquellas que representan a las emulsiones preparadas a 60°C. Además, se corrobora el efecto conocido de la temperatura en los líquidos, donde el aumento de la temperatura reduce la fuerza de cohesión entre las moléculas y por ende la resistencia al movimiento (Orduño, 2011).

3.5 INFLUENCIA DEL TAMAÑO PROMEDIO DE LAS GOTAS EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES

Para analizar los resultados obtenidos con respecto a la distribución del tamaño de las gotas en las emulsiones, se realizaron las Tablas 8, 9, 10 y 11; que permiten observar que sucede con el tamaño de las gotas cuando se varía alguno de los factores de entrada establecidos.

En la Tabla 8 se observa, como ya se había mencionado anteriormente, que un incremento en el contenido de agua ocasiona un aumento del tamaño de las gotas de la emulsión (Sandoval et al., 2014).

Tabla 8. Efecto de la concentración de agua en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Chichimene.

% H ₂ O	10 % - 20%	20% - 30%	10 % - 20%	20% - 30%	
Subcódigo.	01 - 05	05 - 09	02 - 06	06 - 10	
45 ° C	↑	↑	↑	↑	60 ° C
1800 RPM					1800 RPM
45 ° C	↑	↑	↑	↑	60 ° C
4000 RPM					4000 RPM
Subcódigo.	03 - 07	07 - 11	04 - 08	08 - 12	

Por otra parte, la Tabla 9 muestra que al aumentar la temperatura de producción, aumenta el tamaño promedio de las gotas con excepción en las emulsiones preparadas con 30% de agua; esto se debe a que el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad y permite la coalescencia de algunas gotas (Tadros, 2013).

Tabla 9. Efecto de la temperatura en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Chichimene.

Velocidad	% H ₂ O	45 °C – 60 °C	Subcódigo.
1800 RPM	10%	↑	01 – 02
	20%	↑	05 – 06
	30%	↑	09 – 10
4000 RPM	10%	↑	03 - 04
	20%	↑	07 - 08
	30%	↓	11 - 12

Tabla 10. Efecto de la temperatura en el tamaño promedio de las gotas. Crudo Castilla.

Velocidad	% H ₂ O	45 °C – 60 °C	Subcódigo.
1800 RPM	10%	↑	13 – 14
	20%	↑	17 – 18
	30%	↑	21 - 22
4000 RPM	10%	↑	15 – 16
	20%	↑	19 - 20
	30%	↑	23 - 24

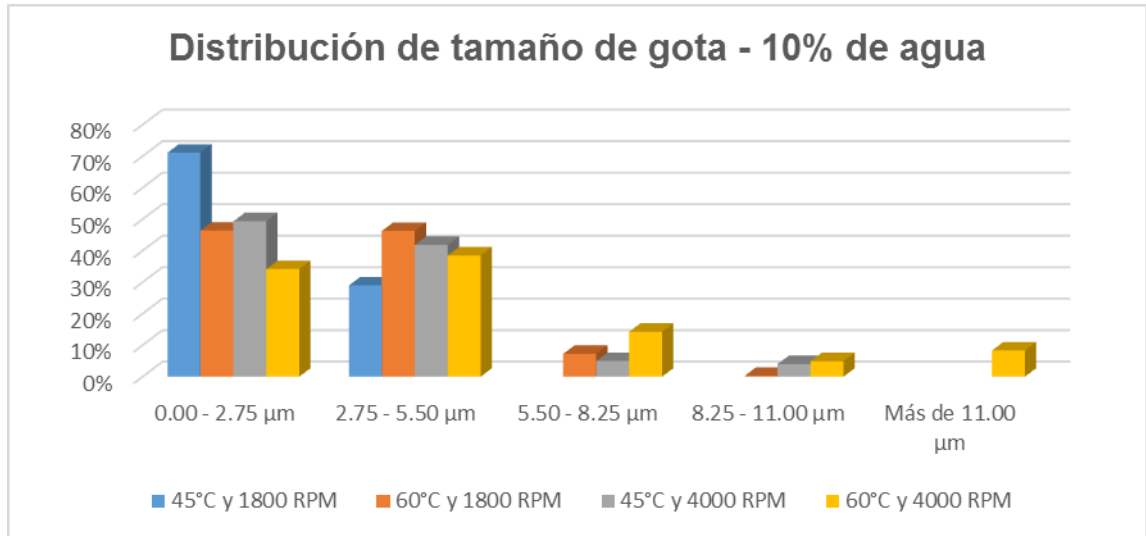
Finalmente, de los resultados de la Tabla 11, se ratifica que la alta viscosidad de los crudos no permite que las gotas se muevan libremente y el efecto que tiene la velocidad de agitación es el de juntar las gotas haciendo que se formen gotas más grandes; sin embargo, cuando se tiene una alta concentración de agua, las gotas son más grandes y, por lo tanto, puede darse una reducción en el tamaño promedio que es lo que se observa en la tabla.

Tabla 11. Efecto de la velocidad de producción en el tamaño promedio de las gotas para el crudo Chichimene

Temperatura	% H ₂ O	1800 RPM – 4000 RPM	Subcódigo
45 °C	10%	↑	01 – 03
	20%	↑	05 – 07
	30%	↑	09 – 11
60 °C	10%	↑	02 – 04
	20%	↑	06 – 08
	30%	↓	10 - 12

Por otra parte, en la Figura 14 se puede observar la distribución del tamaño de gota de las diferentes emulsiones preparadas con el crudo Chichimene a una concentración de agua del 10%. De esta figura se puede destacar que la mayoría de las emulsiones tienen una distribución de tamaño por debajo de los 5.5 µm, sobre todo las preparadas a 1800 RPM; mientras que las emulsiones preparadas a 4000 RPM tienen tamaños superiores. En general, esto se puede observar para todos los crudos de la misma forma en las gráficas del anexo F; donde se aprecia que, la mayoría de las emulsiones que fueron preparadas a 1800 RPM tienen una distribución hacia tamaños de partícula menores que aquellas que fueron preparadas a 4000 RPM independientemente de la cantidad de agua de la emulsión.

Figura 14. Distribución del tamaño de gota con 10% de agua para Crudo Chichimene.



Al realizarse el proceso de mezclado, las pequeñas gotas presentes en la emulsión son arrastradas produciendo choques frecuentes, este hecho ocasiona variaciones en la viscosidad de las emulsiones. A continuación, se explican algunas de estas variaciones:

- Para el crudo Chichimene a mayores tamaños de partícula, la viscosidad aumenta, esto debido a que este crudo es conocido como el que posee la menor gravedad API y como ya se explicó antes este tiene la menor capacidad de almacenar agua y su viscosidad aumenta ya que no puede moverse libremente y que con el aumento de la velocidad de agitación genera gotas más grandes.
- Para los crudos Castilla y Rubiales, se observa un comportamiento contrario; es decir, a menores tamaños de gota la viscosidad tiende a aumentar, cabe recordar que estos crudos poseen una mayor gravedad API por lo que su capacidad para mantener agua en la emulsión de forma estable es superior, esto conlleva a que una mayor cantidad de agua en gotas muy pequeñas dificultan el movimiento y por ende aumentan la viscosidad.

4. CONCLUSIONES

- El comportamiento reológico de las emulsiones directas de crudos pesados depende fuertemente de la concentración de agua y la velocidad de deformación. Otros factores como la temperatura de producción y la velocidad de agitación, junto con el tamaño promedio de las gotas, lo afectan en menor proporción.
- El efecto de la temperatura de preparación en la viscosidad es congruente con la literatura, es decir, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura. Además, un aumento en la temperatura facilita que se presente el fenómeno coalescencia que conlleva a obtener gotas de mayor tamaño.
- Como se evidencia en la tabla se efectos, los tamaños de gota se ven directamente influenciados por la velocidad de producción; es decir, a mayor velocidad de producción aumentan los tamaños de gota en los tres crudos. Este mismo fenómeno ocurre al aumentar la temperatura en la preparación de las emulsiones, exceptuando las emulsiones preparadas con 30% de agua, ya que en estas el tamaño de gota disminuye, aunque esta disminución no se evidencia en la viscosidad de los crudos puesto que es mínima tanto la variación como la influencia de esta variable en las viscosidades.

5. RECOMENDACIONES

- Sería pertinente realizar un análisis que incluyera más velocidades de agitación y temperaturas intermedias en la preparación de las emulsiones con el fin de obtener una mayor cantidad de datos y corroborar lo que se encontró en esta investigación.
- Se recomienda hacer un estudio sobre cómo se afecta el comportamiento reológico de las emulsiones que contienen algún tipo de agente emulsificante, y como su presencia pudiera afectar el porcentaje de agua presente en las emulsiones y a la vez su punto de inversión.
- No se considera apropiado extender los porcentajes de agua y otros valores de variables aquí trabajados en otros petróleos teniendo en cuenta solo su gravedad API, puesto que la viscosidad y la gravedad no tiene una relación directa entre ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Britanija, V. (2008). Malvern Instruments Ltd ., Worcestershire , Velika Britanija.

Da Silva, A. (2009). Bombeo Electrosumergible (BES).

ECOPETROL. (2014). ecopetrol.pdf.

Farah, M. A., Oliveira, R. C., Navaes, J., & Rajagopal, K. (2005). Viscosity of water-in-oil emulsions : Variation with temperature and water volume fraction, *48*, 169–184. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.06.014>

Felix, J. J., Bremner, C., Brough, B., Baker, A., Pattison, K., Brown, G., ... Cárdenas, J. L. De. (2006). La importancia del petróleo pesado, 38–59.

Fernández Arteaga, A. (2006). *Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W*.

Garcia Chinchilla, C. A. (2003). Efecto de la concentración de surfactante en la estabilidad de emulsiones.

Jimeno, C. L., Burgos, J. I., & Fernandez, P. A. G. (2002). El petróleo. El recorrido de la energía. *Madridinnova, Primera ed*, 19.

Labs, P. technology. (2014). Particle technology Labs.

Langer, J. L. (2015). Crudos pesados El reto para Colombia.pdf.

Marfisi, S., & Salager, L. (2004). Principios y Tecnología, DESHIDRATACIÓN DE CRUDO. *Universidad de Los Andes*, 1 – 37.

Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). Desintegración de tamaños. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Morales Corozo, R. (2014). No Title No Title. *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Orduño, M. (2011). Relación entre Viscosidad y Temperatura.

Oyarvide, R., & Udeos, E. (2010). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Sandoval, L., Cañas, W., & Martínez, R. (2014). WATER-IN-OIL EMULSIONS OF HEAVY AND EXTRA-HEAVY LIVE OILS : EXPERIMENTAL EVALUATION, 5, 5–22.

Tadros, T. F. (2013). Emulsion Formation , Stability , and Rheology.

Torres Ome, A. F. (2013). Predicción y Determinación de Emulsiones.pdf.

BIBLIOGRAFÍA

BRITANIJA, V. Malvern Instruments Ltd ., Worcestershire , Velika Britanija. 2008

DA SILVA, A. Bombeo Electrosumergible (BES). 2009

ECOPETROL. ecopetrol.pdf. 2014

FARAH, M. A., OLIVEIRA, R. C., NAVAES, J., & RAJAGOPAL, K. Viscosity of water-in-oil emulsions : Variation with temperature and water volume fraction, 48, 169–184 2005. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.06.014>

FELIX, J. J., BREMNER, C., BROUGH, B., BAKER, A., PATTISON, K., BROWN, G., ... CÁRDENAS, J. L. DE. La importancia del petróleo pesado, 38–59. 2006

FERNÁNDEZ ARTEAGA, A. Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W. 2006

GARCIA CHINCHILLA, C. A. Efecto de la concentración de surfactante en la estabilidad de emulsiones. 2003

JIMENO, C. L., BURGOS, J. I., & FERNANDEZ, P. A. G. El petróleo. El recorrido de la energía. Madridinnova, Primera ed, 19. 2002

LABS, P. TECHNOLOGY. Particle technology Labs. 2014

LANGER, J. L. Crudos pesados El reto para Colombia.pdf. 2015

MARFISI, S., & SALAGER, L. Principios y Tecnología, DESHIDRATACIÓN DE CRUDO. Universidad de Los Andes, 1 – 37. 2004

MELOROSE, J., PERROY, R., & CAREAS, S. Desintegración de tamaños. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, 1. 2015
<http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

MORALES COROZO, R. No Title No Title. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS, 53(9), 1689–1699. 2014 <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ORDUÑO, M. Relación entre Viscosidad y Temperatura. 2011

OYARVIDE, R., & UDEOS, E. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. 2010

SANDOVAL, L., CAÑAS, W., & MARTINEZ, R. WATER-IN-OIL EMULSIONS OF HEAVY AND EXTRA-HEAVY LIVE OILS : EXPERIMENTAL EVALUATION, 5, 5–22. 2014

TADROS, T. F. Emulsion Formation , Stability , and Rheology. 2013

TORRES OME, A. F. Predicción y Determinación de Emulsiones.pdf. 2013

Anexos

Anexo A: Tablas de datos de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación de la velocidad de agitación, contenido de agua y temperatura de producción.

Anexo A 1. Valores de viscosidad a 30 s^{-1} . Crudo Chichimene.

EMULSIÓN	%H ₂ O	T _{producción}	RPM	μ (45°C) [Pa·s]	μ (60°C) [Pa·s]
16027-01	10	45	1800	54	14.8
16027-05	20	45	1800	60.7	18.6
16027-09	30	45	1800	43.3	10.7
16027-02	10	60	1800	38.4	12.9
16027-06	20	60	1800	53.2	20.3
16027-10	30	60	1800	35.1	13.6
16027-03	10	45	4000	49.2	11.5
16027-07	20	45	4000	56.4	14.3
16027-11	30	45	4000	47.2	12.1
16027-04	10	60	4000	31.2	10.5
16027-08	20	60	4000	50	17.5
16027-12	30	60	4000	39.6	14.9

Anexo A 2. Valores de viscosidad a 30 s^{-1} . Crudo Castilla.

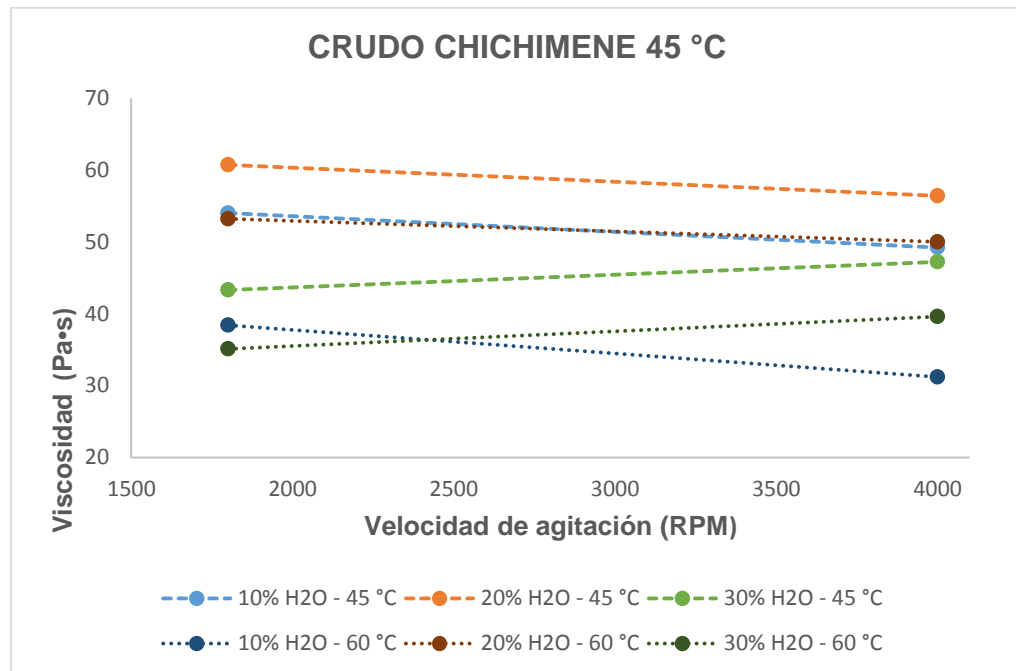
EMULSIÓN	RPM	T _{producción}	%H ₂ O	μ (45°C) [Pa·s]	μ (60°C) [Pa·s]
16027-13	1800	45	10	2.33	0.84
16027-17	1800	45	20	3.42	1.25
16027-21	1800	45	30	3.59	1.31
16027-14	1800	60	10	2.24	0.83
16027-18	1800	60	20	2.75	1.10
16027-22	1800	60	30	2.84	1.13
16027-15	4000	45	10	2.06	0.62
16027-19	4000	45	20	3.15	1.14
16027-23	4000	45	30	3.63	1.36
16027-16	4000	60	10	2.03	0.73
16027-20	4000	60	20	2.58	1.05

EMULSIÓN	RPM	T_{producción}	%H₂O	μ (45°C) [Pa•s]	μ (60°C) [Pa•s]
16027-24	4000	60	30	3.05	1.24

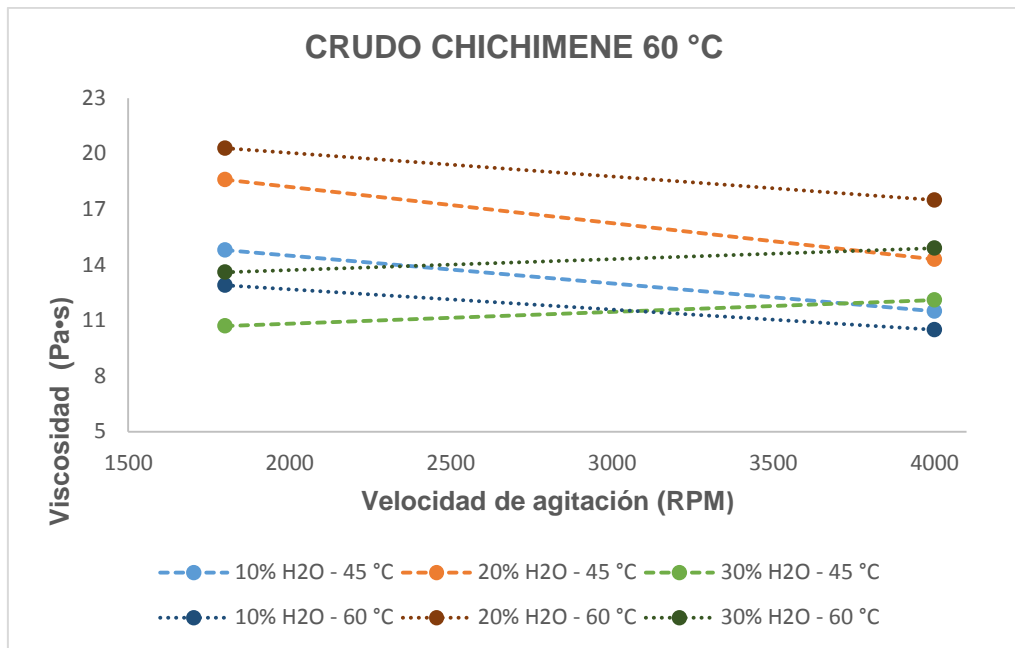
Anexo A 3. Valores de viscosidad a 30 s⁻¹. Crudo Rubiales.

EMULSIÓN	RPM	T_{Producción}	%H₂O	μ (45°C) [Pa•s]	μ (60°C) [Pa•s]
16027-25	1800	45	10	1.33	0.44
16027-29	1800	45	20	1.78	0.61
16027-33	1800	45	30	2.68	0.86
16027-26	1800	60	10	1.14	0.43
16027-30	1800	60	20	1.48	0.63
16027-34	1800	60	30	2.10	0.89
16027-27	4000	45	10	1.26	0.42
16027-31	4000	45	20	1.70	0.56
16027-35	4000	45	30	2.76	0.87
16027-28	4000	60	10	1.07	0.40
16027-32	4000	60	20	1.37	0.58
16027-36	4000	60	30	2.25	0.92

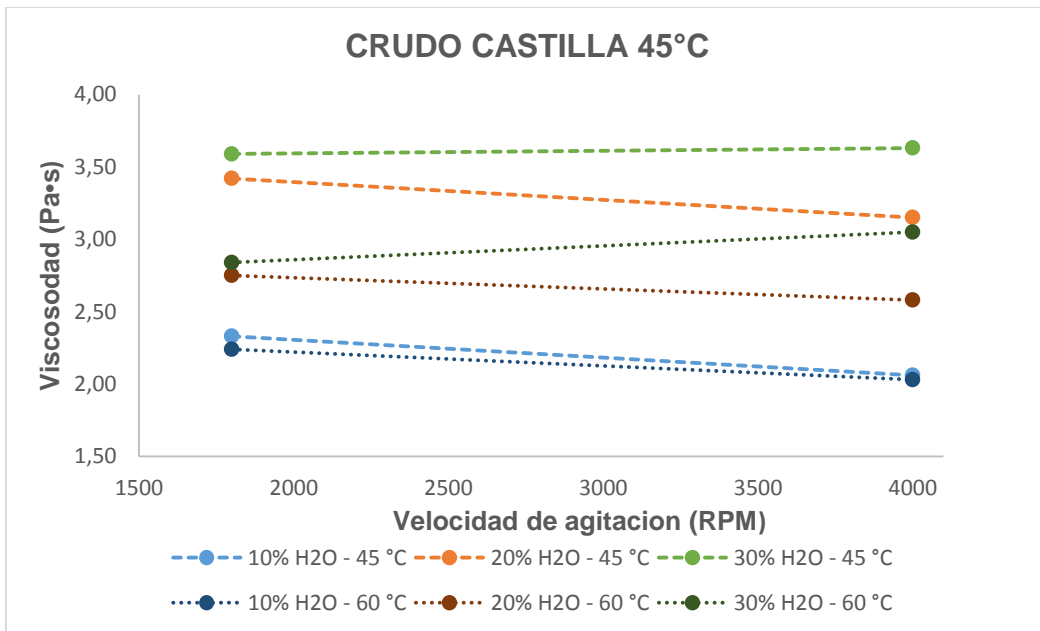
Anexo B: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación del contenido de agua presente en las emulsiones.



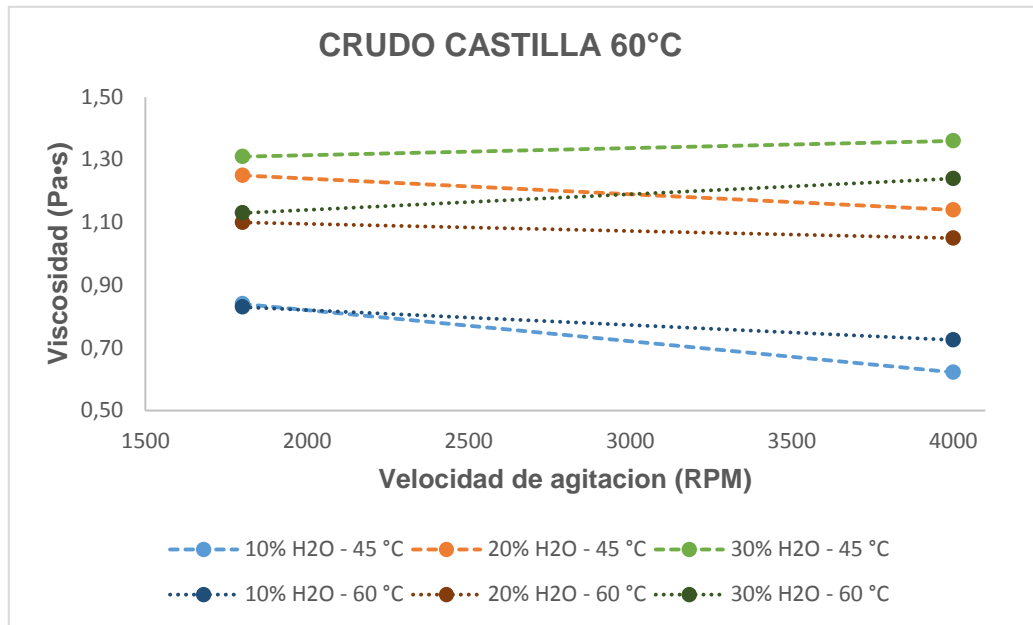
Anexo B 1. Viscosidad del Crudo Chichimene a 45 °C



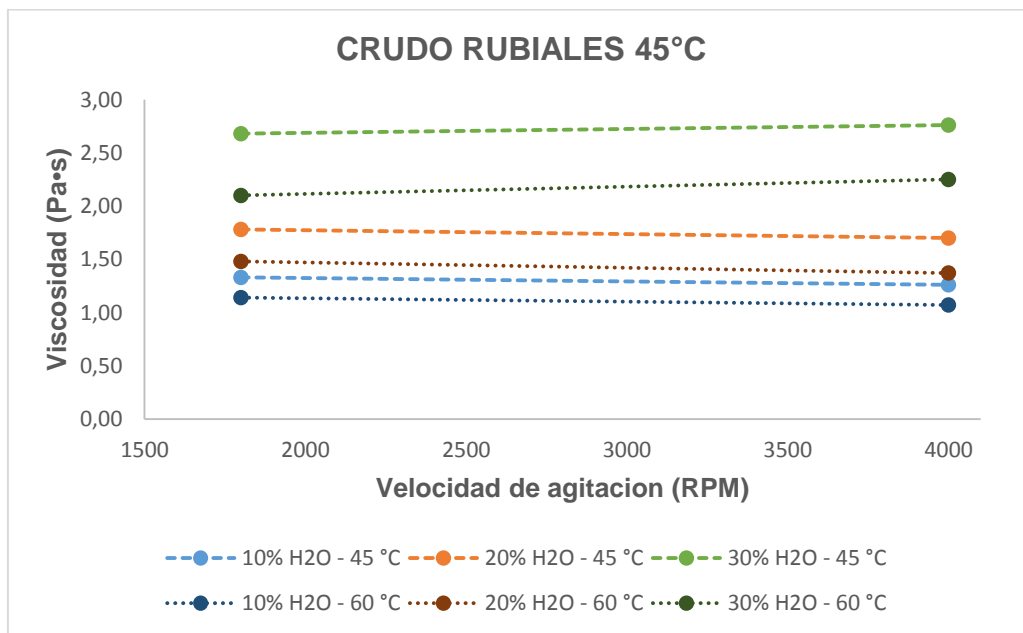
Anexo B 2. Viscosidad del Crudo Chichimene 60 °C



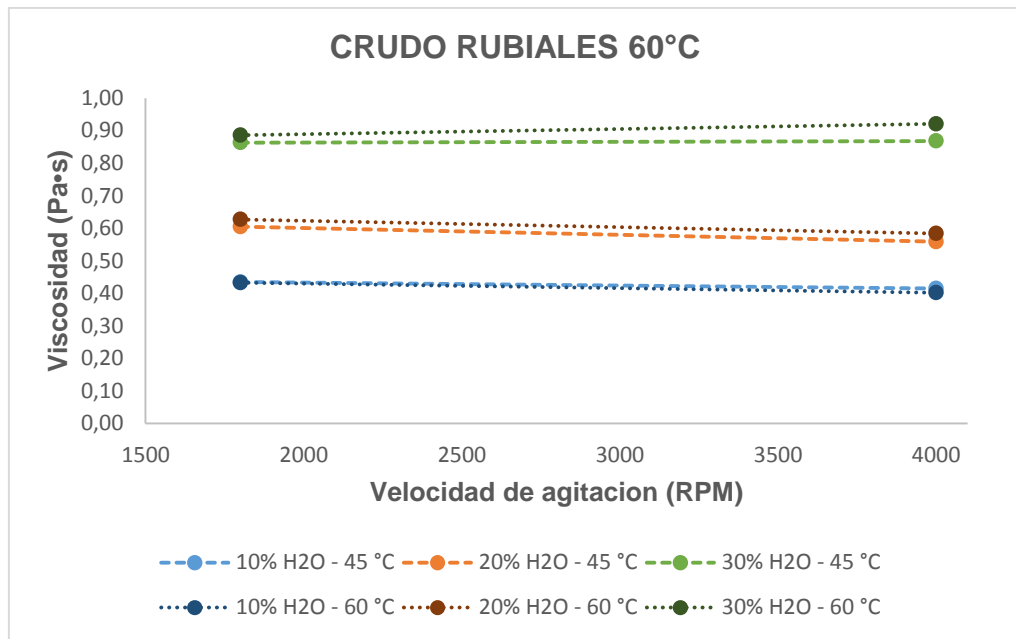
Anexo B 3. Viscosidad del Crudo Castilla a 45 °C



Anexo B 4. Viscosidad del Crudo Castilla 60 °C

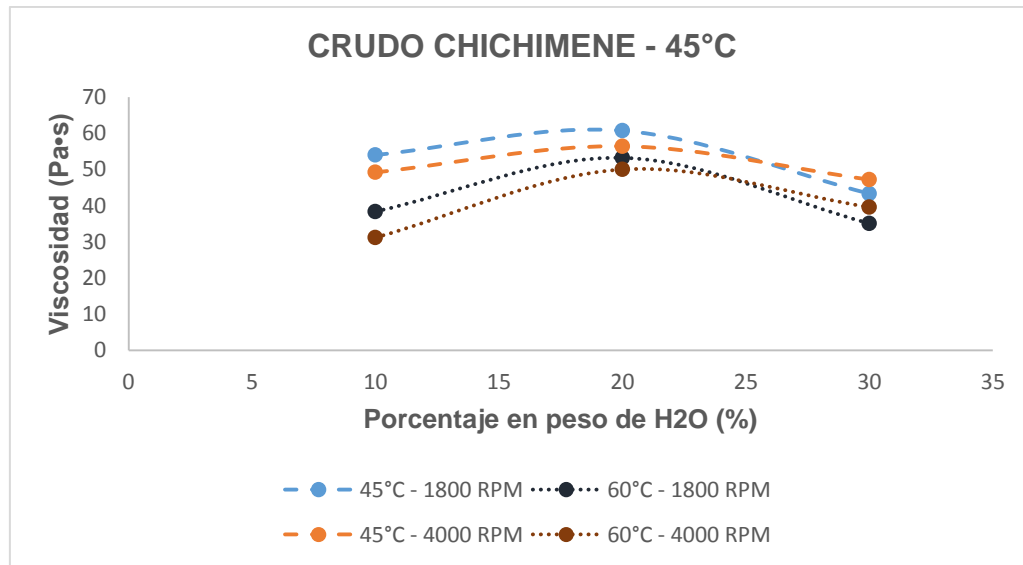


Anexo B 5. Viscosidad del Crudo Rubiales a 45 °C

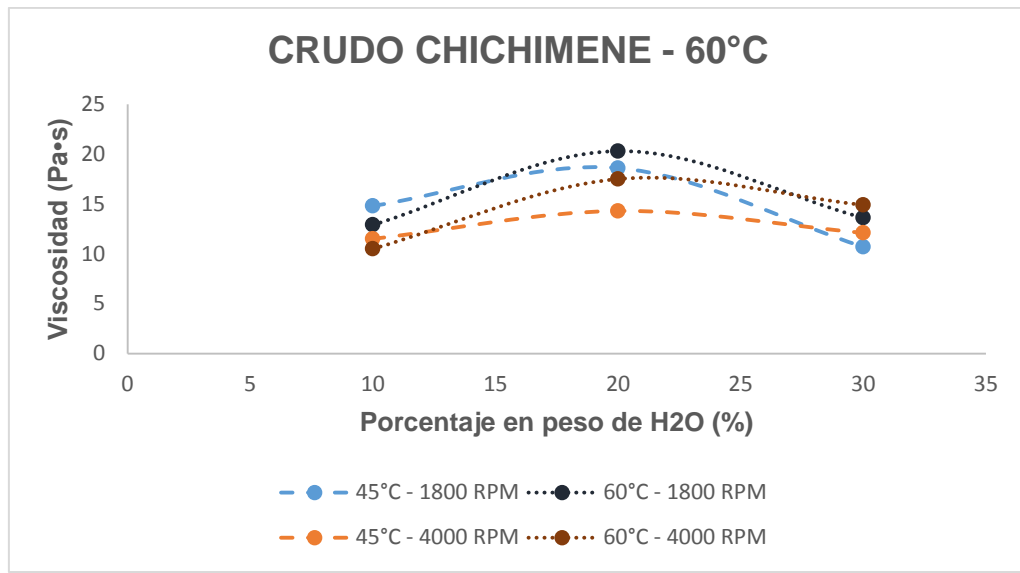


Anexo B 6. Viscosidad del Crudo Rubiales a 60 °C

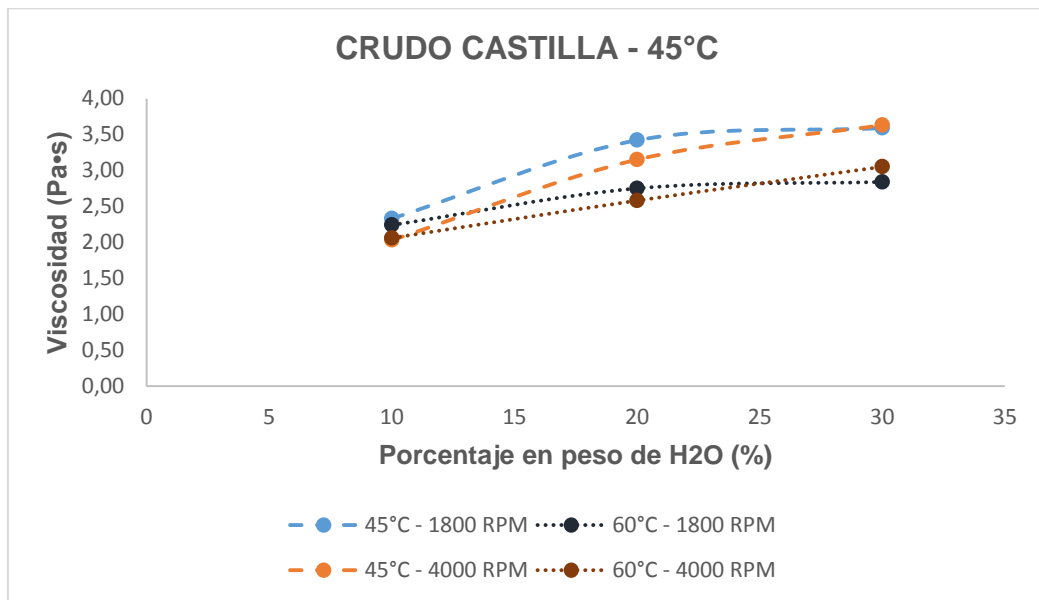
Anexo C: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación del contenido de agua presente en las emulsiones.



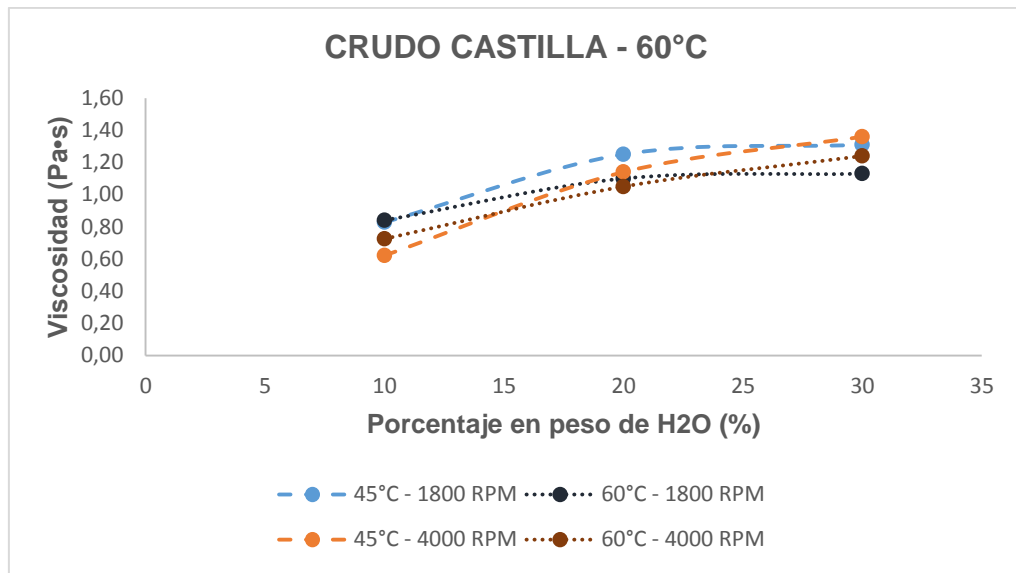
Anexo C 1. Viscosidad del Crudo Chichimene a 45 °C respecto a la variación del contenido de agua.



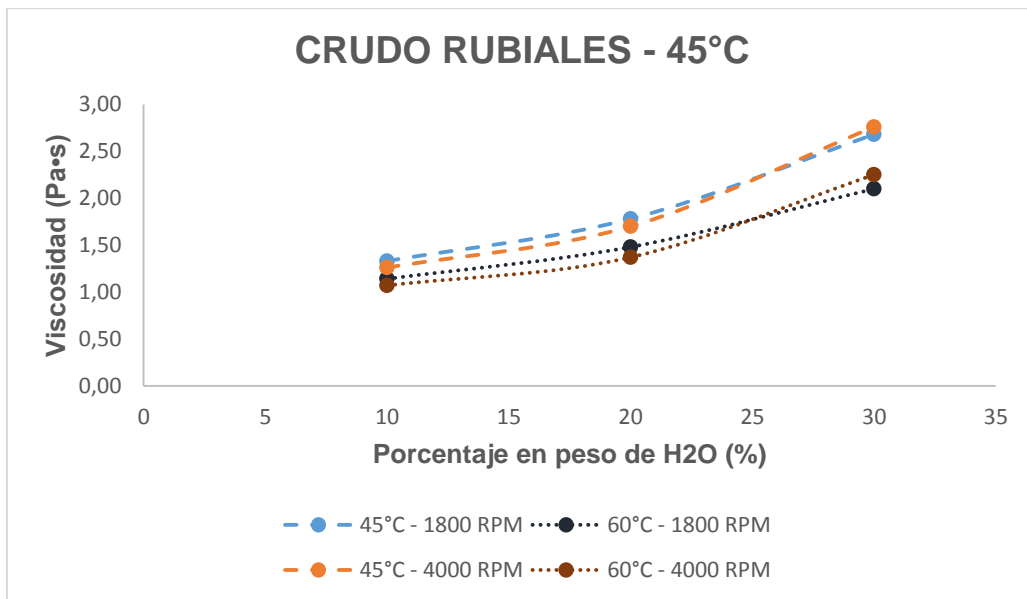
Anexo C 2. Viscosidad del Crudo Chichimene a 60 °C respecto a la variación del contenido de agua.



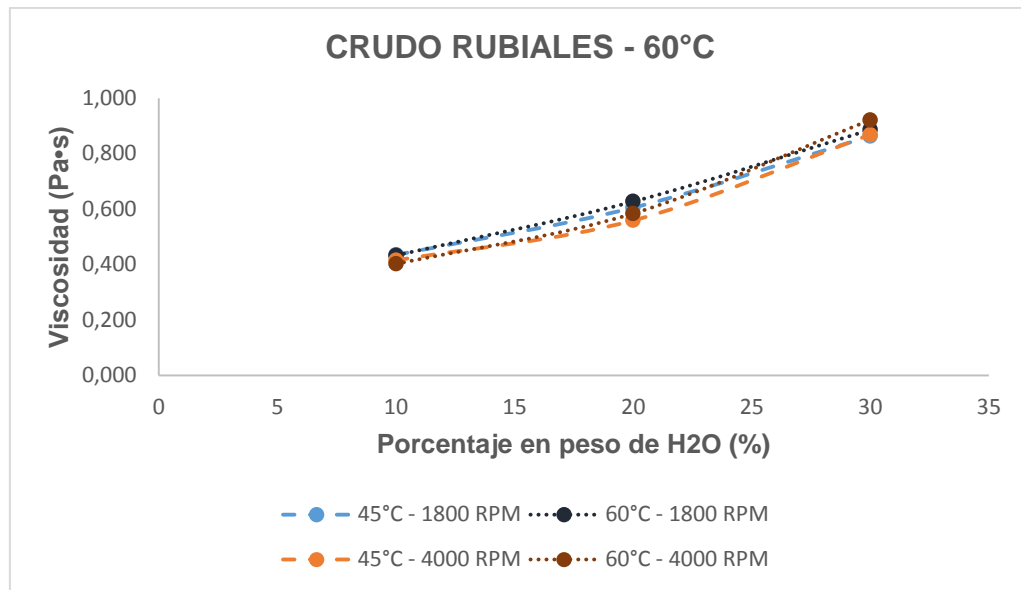
Anexo C 3. Viscosidad del Crudo Castilla a 45 °C respecto a la variación del contenido de agua.



Anexo C 4. Viscosidad del Crudo Castilla a 60 °C respecto a la variación del contenido de agua.



Anexo C 5. Viscosidad del Crudo Rubiales a 45 °C respecto a la variación del contenido de agua.



Anexo C 6. Viscosidad del Crudo Rubiales a 60 °C respecto a la variación del contenido de agua.

**Anexo D: Tablas de distribución de tamaño de gota. Realizadas 3 réplicas y
analizado el promedio**

Anexo D 1. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -01

16027-01	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	13.4	13.2	15.8	14.08
RESIDUAL	8.75	14.9	11.4	11.41
5	1.22	0.75	1.2	1.03
10	1.42	0.89	1.33	1.18
30	1.95	1.29	1.82	1.66
50	2.45	1.78	2.25	2.14
70	2.95	2.32	2.87	2.69
90	4.07	3.34	3.64	3.67
100	5.69	4.88	4.88	5.13
D(4,3)	2.47	1.78	2.29	2.1

Anexo D 2. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -02.

16027-02	REPLICA 1	REPLICA 2	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	14.3	14.5	14.40
RESIDUAL	7.66	7.05	7.35
5	1.52	1.42	1.47
10	1.78	1.62	1.70
30	2.45	2.12	2.28
50	3.09	2.64	2.86
70	3.9	3.12	3.49
90	5.02	4.08	4.53
100	9	7.72	8.34
D(4,3)	3.22	2.77	2.99

Anexo D 3. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -03.

16027-03	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	11.7	14.7	14.4	13.53
RESIDUAL	12.6	4.55	4.36	6.30
5	0.69	1.67	1.26	1.13
10	0.84	1.91	1.57	1.36
30	1.42	2.64	2.47	2.10
50	1.89	3.31	3.41	2.77
70	2.48	4.19	4.53	3.61
90	3.50	5.58	5.99	4.89
100	10.48	10.48	10.48	10.48
D(4,3)	2.03	3.53	3.35	2.88

Anexo D 4. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -04

16027-04	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	12.3	10.1	13.5	11.88
RESIDUAL	7.8	2.95	3.2	4.19
5	1.42	1.42	1.4	1.41
10	1.65	1.74	1.67	1.69
30	2.32	2.72	2.65	2.56
50	2.89	3.95	3.73	3.49
70	3.6	6.12	5.67	5.00
90	4.82	11.09	13.04	8.87
100	9	26.2	41.43	21.38
D(4,3)	3.05	4.65	4.93	4.12

Anexo D 5. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -05.

16027-05	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	10.7	13.2	10.9	11.55
RESIDUAL	7.21	2.05	3.47	3.72
5	1.22	1.46	1.66	1.44
10	1.49	1.69	1.95	1.70
30	2.28	2.26	2.85	2.45
50	3.09	2.93	3.78	3.25
70	4.16	3.65	4.95	4.22
90	5.76	5.04	7.17	5.93
100	10.48	10.28	10.48	10.41
D(4,3)	3.17	3.15	3.87	3.38

Anexo D 6. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -06.

16027-06	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	14.9	13.4	12.3	13.49
RESIDUAL	3.75	1.59	5.93	3.28
5	1.43	1.43	0.9	1.23
10	1.74	1.96	1.15	1.58
30	2.85	3.54	2.14	2.78
50	3.96	5.22	3.17	4.03
70	5.72	7.72	4.78	5.95
90	9.62	11.93	7.15	9.36
100	19.31	30.53	14.22	20.31
D(4,3)	4.36	5.46	3.20	4.24

Anexo D 7. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -07

16027-07	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	9.4	13.2	11.6	11.29
RESIDUAL	3.18	2.02	2.1	2.38
5	1.43	1.43	1.56	1.47
10	1.67	1.78	2.11	1.84
30	2.72	3.59	4.53	3.54
50	3.99	5.88	7.31	5.56
70	5.72	9.23	11.34	8.43
90	10.43	17.15	18.3	14.85
100	22.49	34.56	38	30.91
D(4,3)	4.45	6.04	7.04	5.74

Anexo D 8. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -08.

16027-08	REPLICA 1	REPLICA 2	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	13.1	11.3	12.17
RESIDUAL	0.89	3.37	1.73
5	1.42	1.42	1.42
10	1.76	1.85	1.80
30	2.96	3.9	3.40
50	4.45	6.22	5.26
70	7.2	9.8	8.40
90	17.65	21.16	19.32
100	22.2	28.91	25.33
D(4,3)	5.13	6.27	5.67

Anexo D 9. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -09.

16027-09	REPLICA 1	REPLICA 2	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	11.6	11.5	11.55
RESIDUAL	6.6	4.8	5.63
5	1.56	0.9	1.18
10	1.81	1.29	1.53
30	4.42	7.42	5.73
50	6.64	10.72	8.44
70	9.02	14.98	11.62
90	12.87	20.42	16.21
100	22.49	30.36	26.13
D(4,3)	5.78	7.04	6.38

Anexo D 10. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -10.

16027-10	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	11.7	10.1	9.2	10.28
RESIDUAL	0.766	2.07	5.02	2.00
5	1.44	1.52	1.68	1.54
10	1.78	2.04	3.13	2.25
30	3.09	4.19	4.3	3.82
50	4.94	6.92	6.44	6.04
70	8.7	11.5	12.9	10.89
90	19.56	20.33	20.05	19.98
100	190.8	48.27	41.43	72.53
D(4,3)	7.45	7.21	7.67	7.44

Anexo D 11. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -11.

16027-11	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	11.7	22.8	19.5	17.33
RESIDUAL	1.4	1.7	2.5	1.81
5	1.44	1.44	1.44	1.44
10	1.9	1.8	1.9	1.87
30	4.6	3.3	4.2	3.99
50	7.6	5.4	7.3	6.69
70	11.5	9.5	12.3	11.04
90	20.4	20.7	24.6	21.82
100	90.8	76.3	65.5	76.85
D(4,3)	7.97	6.83	7.74	7.50

Anexo D 12. Tamaño de gota del crudo Chichimene 16027 -12

16027-12	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	13.2	12.7	12	12.62
RESIDUAL	2.3	3.97	2.9	2.98
5	1.52	1.52	1.32	1.45
10	2.19	2.33	1.9	2.13
30	4.51	4.92	4.19	4.53
50	6.97	7.74	6.75	7.14
70	9.62	10.48	9.6	9.89
90	14.62	15.38	14.76	14.92
100	30.53	26.2	26.2	27.57
D(4,3)	6.42	6.64	5.95	6.33

Anexo D 13. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -13.

16027-13	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	17.8	13.3	20.3	16.88
RESIDUAL	1.3	0.7	0.7	0.86
5	1.06	1.3	1.5	1.27
10	2.5	2.5	2.8	2.60
30	5.7	6.2	6.1	6.00
50	11.9	11.9	13.3	12.35
70	16.8	16.5	19.3	17.49
90	26.3	24.4	30.4	26.92
100	90	48.3	45	58.05
D(4,3)	9.53	8.97	9.85	9.44

Anexo D 14. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -14.

16027-14	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	14.3	14.8	14.2	14.43
RESIDUAL	1.9	2.5	2.2	2.19
5	1.5	1.3	1.5	1.43
10	6.9	6.4	7.3	6.86
30	18.6	18.2	18.3	18.37
50	22.3	23.7	22.8	22.93
70	35.9	35.2	37.2	36.09
90	48.1	45.3	49.6	47.63
100	97.4	99.1	99.5	98.66
D(4,3)	18.43	17.80	18.83	18.35

Anexo D 15. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -15.

16027-15	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	13.6	11.6	17.5	14.03
RESIDUAL	2.7	1.7	3.9	2.62
5	0.95	1.4	0.9	1.06
10	1.2	1.7	1.2	1.35
30	1.95	2.1	1.8	1.95
50	3.9	3.9	4.7	4.15
70	6.3	5.4	8.7	6.66
90	12.7	8.3	17.5	12.26
100	41.4	41.2	41	41.20
D(4,3)	4.33	4.48	4.78	4.53

Anexo D 16. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -16

16027-16	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (μm)
OBSCURO	11.8	16	15.6	14.33
RESIDUAL	3.3	3	3.3	3.20
5	1.3	1.1	1.1	1.16
10	1.9	1.6	1.5	1.66
30	3.5	2.3	2.1	2.57
50	7.03	6.2	5.3	6.14
70	9.6	9.2	8.3	9.02
90	14.3	13.3	12.2	13.24
100	26.2	26.2	26.5	26.30
D(4,3)	5.79	5.02	4.68	5.14

Anexo D 17. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -17

16027-17	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(µm)
OBSCURO	20.3	19.2	19.2	19.56
RESIDUAL	4.7	7.7	8.7	6.80
5	5.3	4.9	4.38	4.85
10	6.68	5.94	4.92	5.80
30	10.48	9.5	8.7	9.53
50	13.82	12.76	12.73	13.09
70	18.8	16.2	16.8	17.23
90	23.97	21.83	22.31	22.69
100	35.56	30.53	35.58	33.80
D(4,3)	13.51	12.10	11.80	12.45

Anexo D 18. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -18

16027-18	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(µm)
OBSCURO	19.7	21.6	21.7	20.98
RESIDUAL	1.97	5.4	5.73	3.94
5	3.09	9.5	8.5	6.30
10	13.16	12.38	11.69	12.40
30	29.8	21.3	19.8	23.25
50	42.98	26.8	26.04	31.07
70	61.3	35.56	33.2	41.67
90	91.15	50.17	46.02	59.48
100	93.77	88.91	86.32	89.61
D(4,3)	30.96	27.07	25.37	27.70

Anexo D 19. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -19

16027-19	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	10.7	13.7	11.5	11.90
RESIDUAL	1.36	1.2	1.7	1.41
5	1.4	1.3	1.3	1.33
10	1.8	1.7	1.8	1.77
30	2.5	2.4	2.9	2.59
50	4.8	5.27	6.3	5.42
70	7.1	8.2	9.7	8.27
90	10.9	12.9	15.8	13.05
100	26.2	30.5	30.5	28.99
D(4,3)	4.83	5.10	5.72	5.20

Anexo D 20. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -20

16027-20	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	19.1	14.7	13.9	15.74
RESIDUAL	3.3	5.7	5.9	4.81
5	0.9	1.02	0.9	0.94
10	1.2	1.5	1.3	1.33
30	2.3	2.3	2.2	2.27
50	7.9	8.2	8.2	8.10
70	16.5	19.3	18.9	18.19
90	41.3	42.9	42.2	42.13
100	103.6	88.9	76.3	88.91
D(4,3)	7.54	8.01	7.46	7.67

Anexo D 21. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -21

16027-21	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(µm)
OBSCURO	12.4	12.8	17.9	14.16
RESIDUAL	4.27	4.55	4.4	4.41
5	5.4	5.3	4.84	5.17
10	6.81	6.37	6.04	6.40
30	9.7	11.2	10.48	10.44
50	13.29	14.49	14.37	14.04
70	17.3	19.3	19.1	18.54
90	22.62	26.88	26.23	25.17
100	35.58	48.27	41.43	41.44
D(4,3)	13.09	14.54	13.72	13.77

Anexo D 22. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -22

16027-22	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(µm)
OBSCURO	13.3	17.7	15.9	15.53
RESIDUAL	7.5	7.9	8.3	7.89
5	4	10.48	9.5	7.36
10	9.11	15.59	13.48	12.42
30	26.2	28.5	30.1	28.22
50	39.22	39.51	45.45	41.30
70	55.5	52.5	48.3	52.02
90	78.41	71.03	88.43	78.97
100	120.67	103.58	120.5	114.63
D(4,3)	29.55	35.50	36.73	33.77

Anexo D 23. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -23

16027-23	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	16.9	14.7	14.6	15.36
RESIDUAL	1.06	1.26	1.4	1.23
5	1.2	1.32	1.32	1.28
10	1.68	2.05	1.88	1.86
30	4.3	4.9	4.19	4.45
50	6.65	7.14	6.16	6.64
70	9.5	9.5	8.7	9.23
90	14.12	14.09	12.68	13.61
100	30.53	22.2	22.49	24.79
D(4,3)	5.86	6.00	5.53	5.79

Anexo D 24. Tamaño de gota del crudo Castilla 16027 -24

16027-24	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	11.8	10.6	14.4	12.17
RESIDUAL	1.5	1.6	1.9	1.66
5	1.9	1.6	1.9	1.79
10	3.5	3.1	3.7	3.42
30	6.6	8.2	7.1	7.27
50	12.2	14.2	13.5	13.27
70	18.2	18.5	18.2	18.30
90	25.2	25.6	26.3	25.70
100	41.4	41.4	41.4	41.40
D(4,3)	10.02	10.18	10.42	10.21

Anexo D 25. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -25

16027-25	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	18.4	11.3	10	12.76
RESIDUAL	1.1	1.3	2.6	1.55
5	0.6	1.2	0.9	0.87
10	0.9	1.6	1.2	1.20
30	1.5	2.2	1.9	1.84
50	3.8	4.2	4.1	4.03
70	5.8	5.8	5.8	5.80
90	9.8	8.8	8.8	9.12
100	103.58	16.57	16.57	30.52
D(4,3)	4.06	3.95	3.55	3.85

Anexo D 26. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -26

16027-26	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	16.8	19.3	18.6	18.20
RESIDUAL	3.6	0.6	0.6	1.09
5	0.8	1.2	1.1	1.02
10	1	1.5	1.4	1.28
30	1.7	2.1	1.9	1.89
50	5.6	4	3.4	4.24
70	8.5	6.8	5.1	6.66
90	12.2	14.5	11.4	12.63
100	22.5	30.5	35.5	28.99
D(4,3)	4.05	4.63	4.13	4.26

Anexo D 27. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -27

16027-27	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	11.1	14.6	11.1	12.16
RESIDUAL	2	1.8	3.2	2.26
5	0.7	0.7	0.6	0.66
10	0.9	0.9	0.9	0.90
30	1.2	1.2	1.2	1.20
50	2.2	2.9	2.9	2.64
70	3.3	5	5.7	4.55
90	6	10.6	10.5	8.74
100	65	30.5	22.5	35.46
D(4,3)	2.99	3.21	3.06	3.09

Anexo D 28. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -28

16027-28	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	11.2	13.4	13.2	12.56
RESIDUAL	1.6	2.01	3.3	2.20
5	0.9	1	0.7	0.86
10	1.2	1.3	0.8	1.08
30	2	2	1.6	1.86
50	4	4.2	2.5	3.48
70	5.5	5.7	4.3	5.13
90	7.7	8.2	7.7	7.86
100	14.2	14.2	14.2	14.20
D(4,3)	3.39	3.56	2.70	3.20

Anexo D 29. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -29

16027-29	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM (µm)
OBSCURO	16.5	12	11.9	13.31
RESIDUAL	0.7	0.9	1.2	0.91
5	1.1	1.1	1.1	1.10
10	1.6	1.6	1.5	1.57
30	2.6	2.6	2.5	2.57
50	5.4	5.4	5.5	5.43
70	7.7	7.7	8.5	7.96
90	11.5	11.8	13.4	12.21
100	126.2	103.58	88.9	105.13
D(4,3)	5.99	5.84	5.83	5.89

Anexo D 30. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -30

16027-30	REPLICA 1	REPLICA 2	REPLICA 3	TAMAÑO PROM
OBSCURO	13.6	18.3	16.8	16.11
RESIDUAL	0.5	1.2	1.5	0.97
5	1.2	1.4	1.1	1.23
10	2	2.6	1.7	2.07
30	4.2	4.9	4.9	4.65
50	9.2	9.5	9.7	9.46
70	13.2	12.5	12.6	12.76
90	17.8	17.5	17.2	17.50
100	30.5	30.5	30.53	30.51
D(4,3)	6.79	7.32	6.67	6.92

Anexo D 31. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -31

16027-31	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	12.3	13.3	12.01	12.52
RESIDUAL	4.3	2.4	3.1	3.17
5	1.1	1.24	0.8	1.03
10	1.6	1.6	1	1.37
30	2.3	2.3	1.4	1.95
50	4.9	4.9	4.6	4.80
70	7.2	7.2	7.8	7.39
90	11.1	10.9	12.3	11.42
100	19.3	22.4	22.5	21.35
D(4,3)	4.37	4.53	3.78	4.22

Anexo D 32. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -32

16027-32	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	14.5	17.6	16.1	16.02
RESIDUAL	0.7	0.8	0.9	0.80
5	1.3	1.1	0.9	1.09
10	1.8	1.6	1.2	1.51
30	2.6	2.6	2.1	2.42
50	5	5	4.8	4.93
70	6.7	6.8	6.7	6.73
90	9.6	9.8	10	9.80
100	16.5	19.3	19.3	18.32
D(4,3)	4.41	4.35	3.91	4.221

Anexo D 33. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -33

16027-33	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	14	17.4	9.6	13.27
RESIDUAL	1.7	1	1.9	1.48
5	1.1	1.1	0.9	1.03
10	1.8	1.6	1.1	1.47
30	3.3	2.7	1.9	2.57
50	6.8	5.9	6	6.22
70	9.5	8.5	9.5	9.15
90	15.2	12.9	17.9	15.20
100	88.9	140.4	103.6	108.95
D(4,3)	6.64	6.38	5.71	6.23

Anexo D 34. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -34

16027-34	REPLICA	REPLICA	REPLICA	TAMAÑO PROM
	1	2	3	(μm)
OBSCURO	15.8	13.8	12.8	14.08
RESIDUAL	0.6	0.9	1.3	0.89
5	1.3	1.2	1.2	1.23
10	2	2.1	2	2.03
30	4.9	5.2	5.7	5.26
50	9.7	10	10.4	10.03
70	13.2	13.2	13.5	13.30
90	18	18.9	18.7	18.53
100	30.5	30.5	30.5	30.50
D(4,3)	7.08	7.19	7.29	7.19

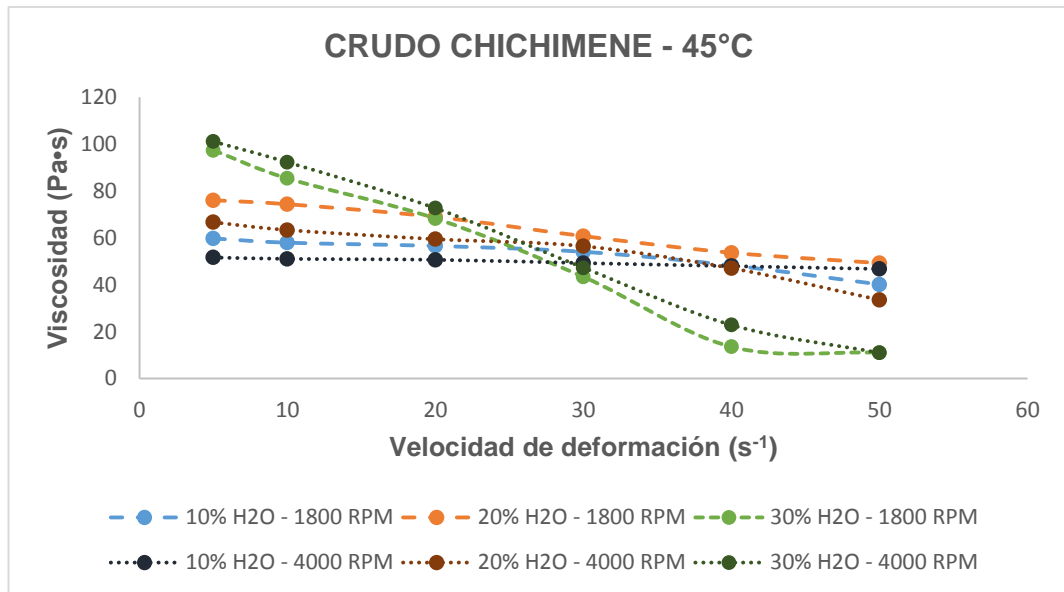
Anexo D 35. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -35

16027-35	REPLICA			TAMAÑO PROM (μm)
	1	2	3	
OBSCURO	14	16.8	13.8	14.81
RESIDUAL	1.16	1.13	1.3	1.19
5	1.1	1.2	1.2	1.17
10	1.9	1.9	1.9	1.90
30	3.6	3.6	3.6	3.60
50	7	7	7.2	7.07
70	9.2	9.3	9.4	9.30
90	13.2	13	13.9	13.36
100	22.5	22.5	22.5	22.50
D(4,3)	5.46	5.52	5.61	5.53

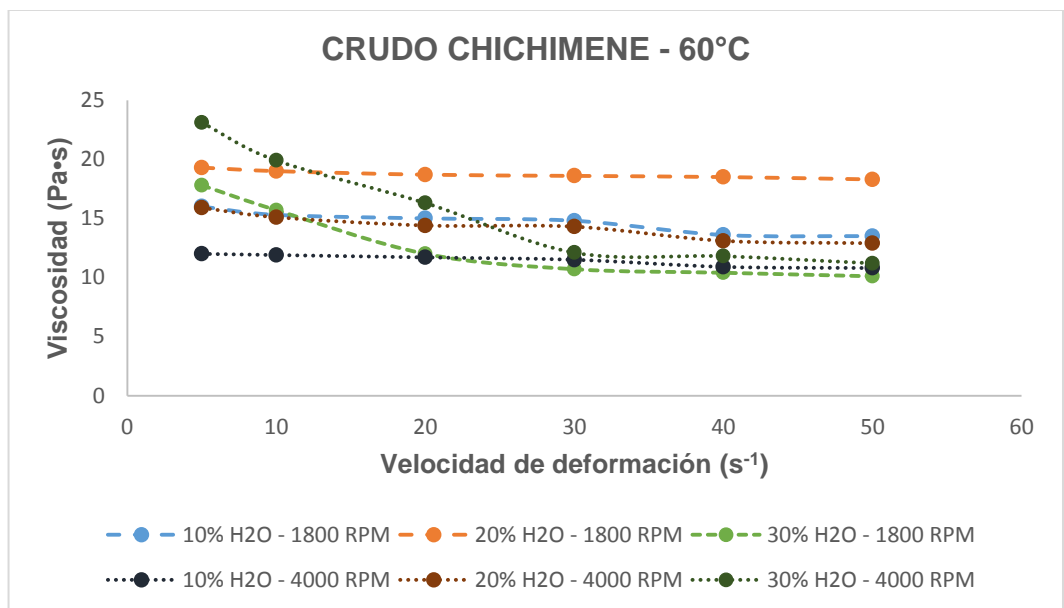
Anexo D 36. Tamaño de gota del crudo Rubiales 16027 -36

16027-36	REPLICA			TAMAÑO PROM (μm)
	1	2	3	
OBSCURO	12.5	15.1	11.1	12.80
RESIDUAL	1.2	0.7	1.7	1.13
5	1.2	1.2	1	1.13
10	1.6	1.6	1.3	1.49
30	2.5	2.4	2.2	2.36
50	5.2	4.8	5.1	5.03
70	7.5	6.9	7.7	7.36
90	11.2	10.4	11.4	10.99
100	19.3	19.3	22.2	20.22
D(4,3)	4.55	4.37	4.33	4.42

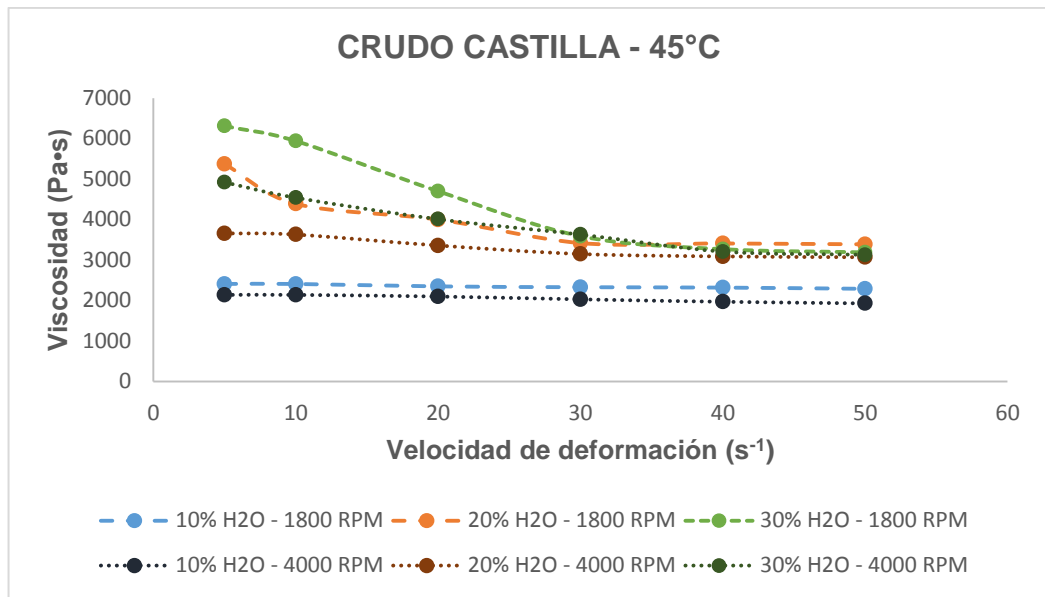
Anexo E: Graficas de los comportamientos de las viscosidades respecto a la variación de la velocidad de deformación.



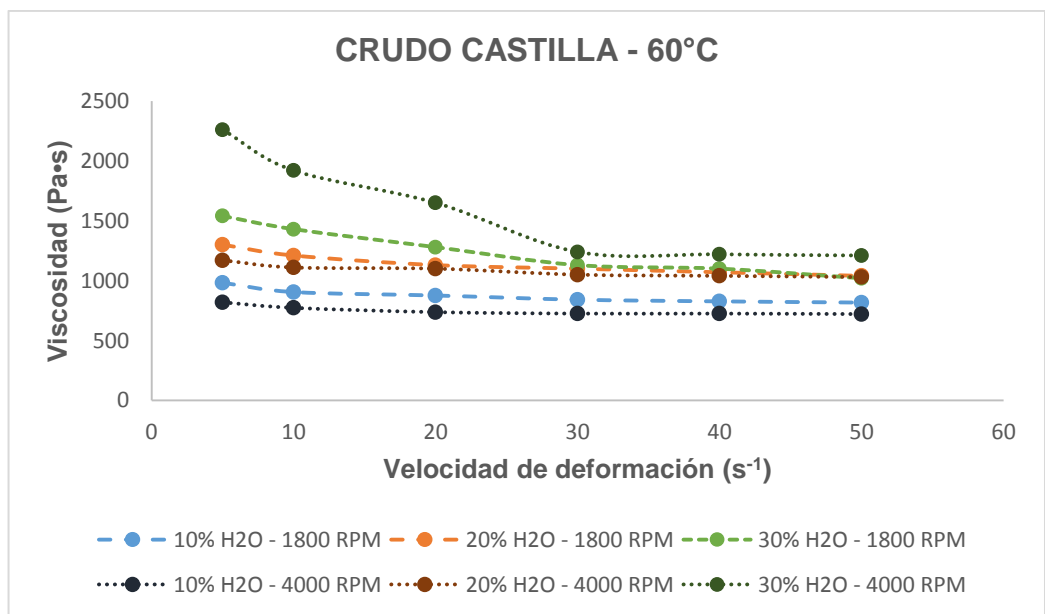
Anexo E 1. Comportamiento reológico crudo Chichimene a 45 °C.



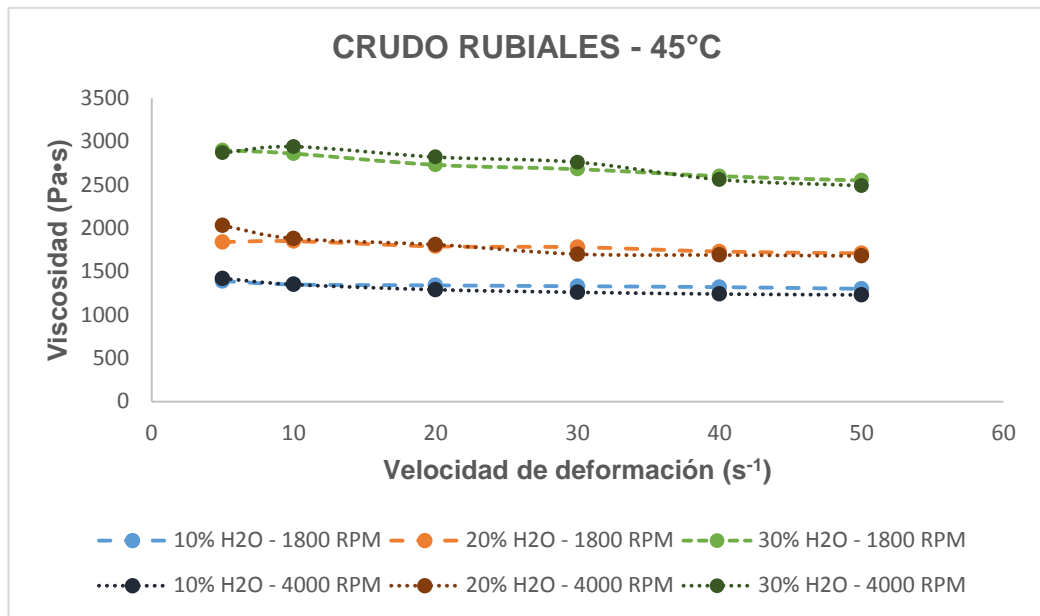
Anexo E 2. Comportamiento reológico crudo Chichimene a 60 °C.



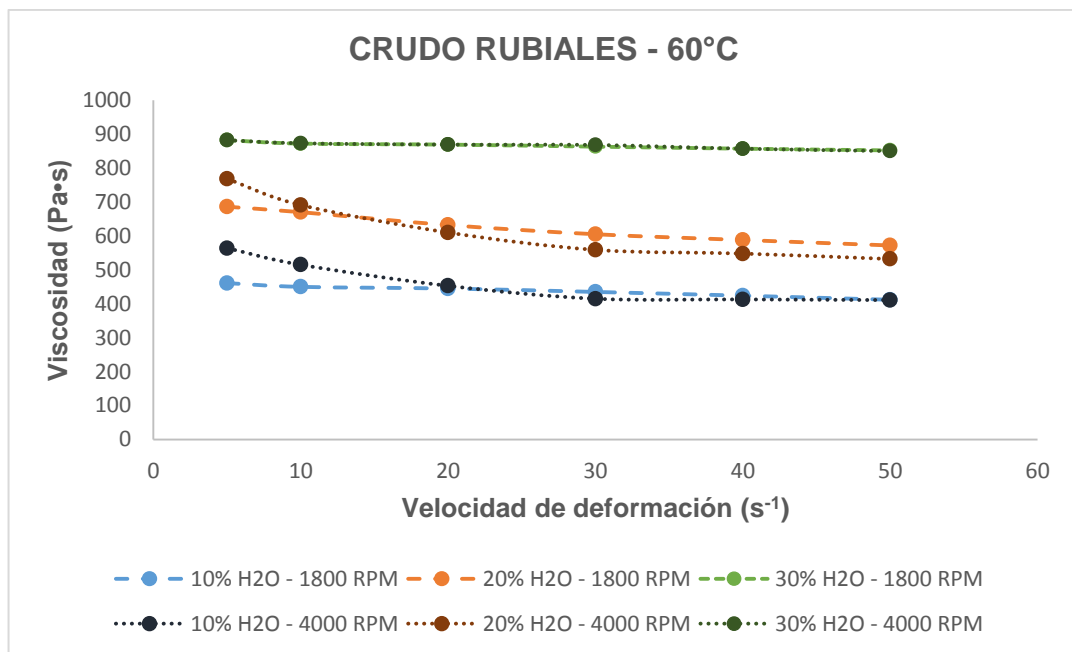
Anexo E 3. Comportamiento reológico crudo Castilla a 45 °C.



Anexo E 4. Comportamiento reológico crudo Castilla a 45 °C.

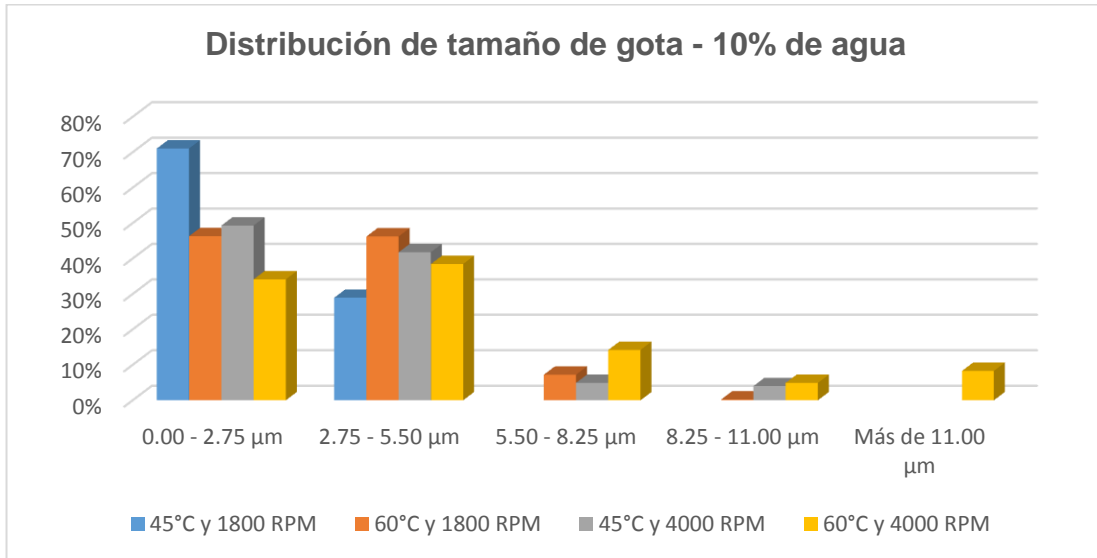


Anexo E 5. Comportamiento reológico crudo Rubiales a 45 °C.

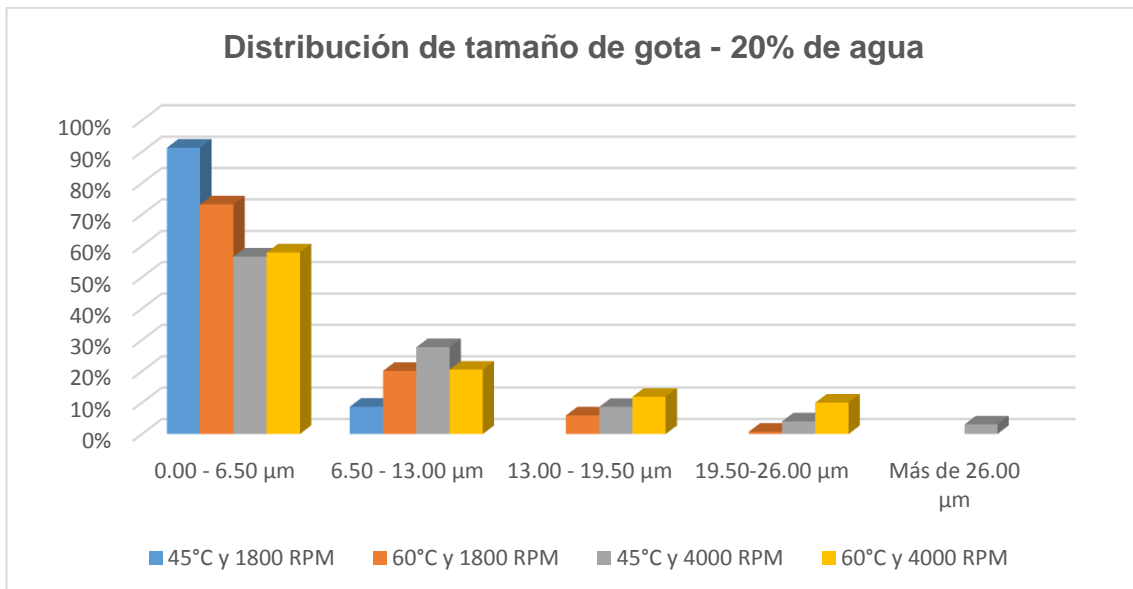


Anexo E 6. Comportamiento reológico crudo Rubiales a 45 °C.

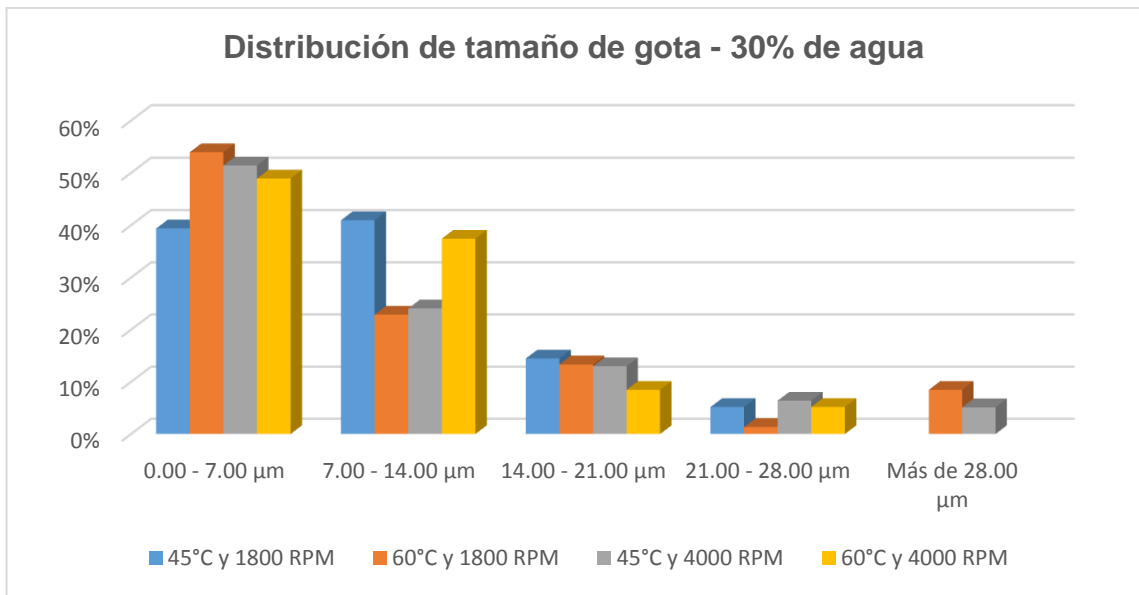
Anexo F: Graficas de distribución de tamaño de gota.



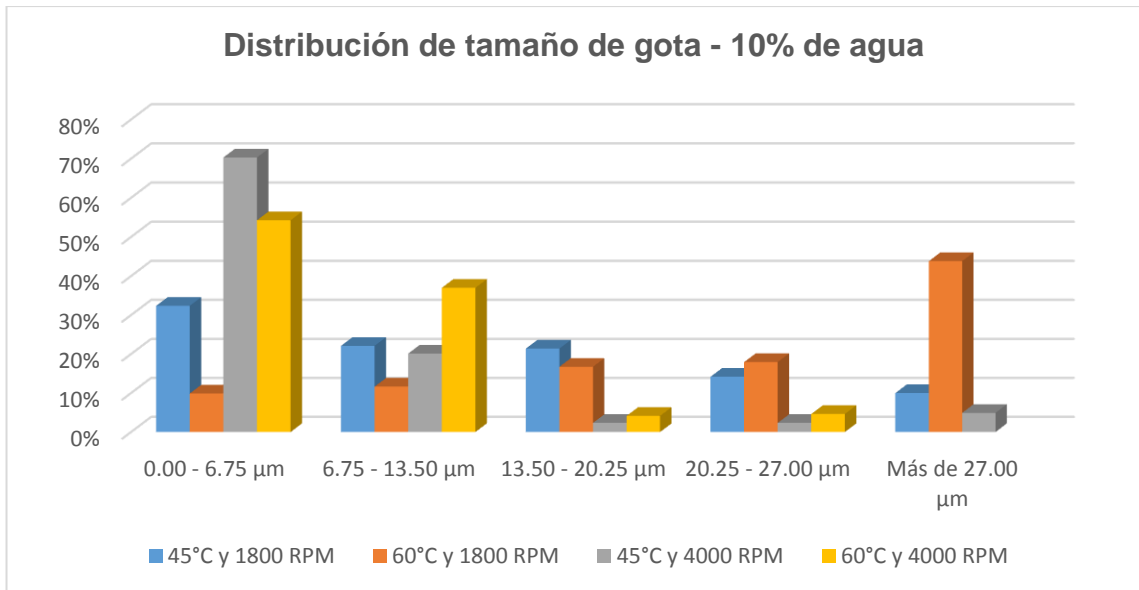
Anexo F 1. Distribución del tamaño de gota con 10% de agua. Crudo Chichimene



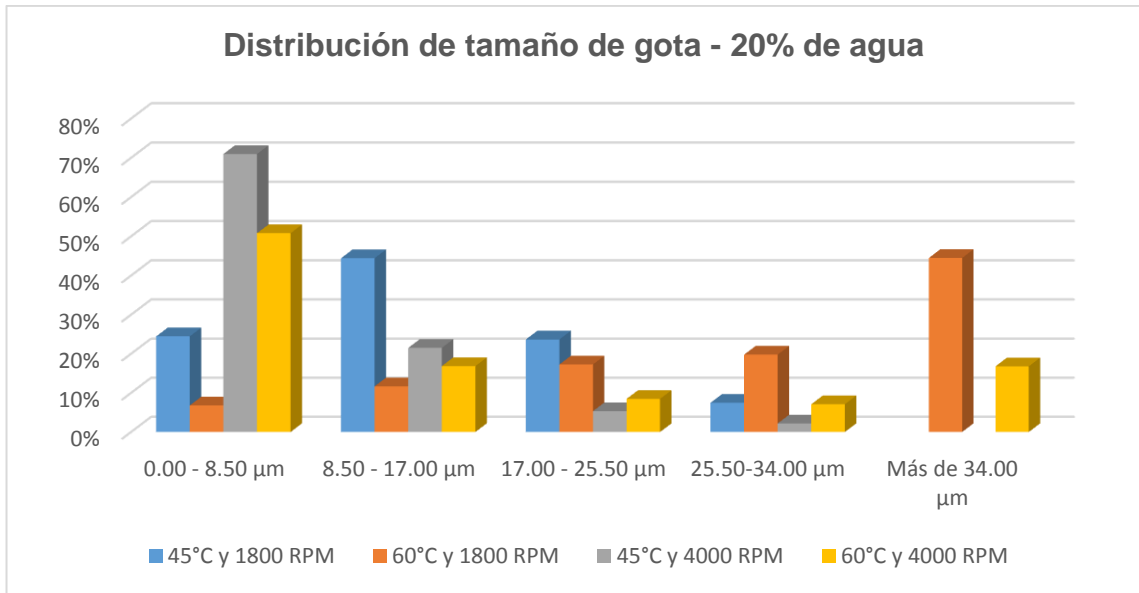
Anexo F 2. Distribución del tamaño de gota con 20% de agua. Crudo Chichimene



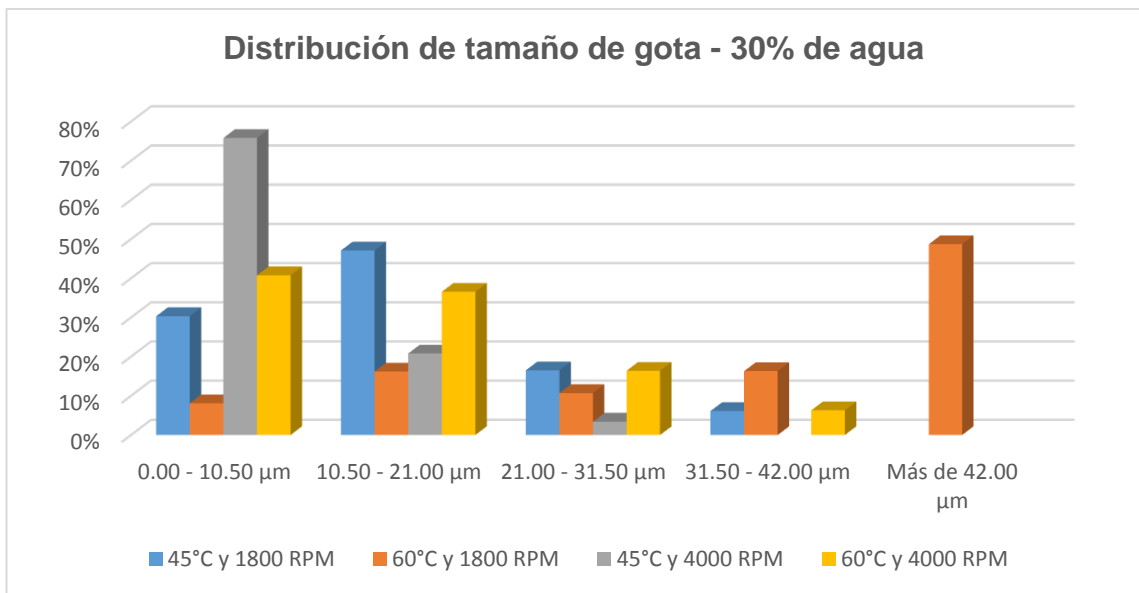
Anexo F 3. Distribución del tamaño de gota con 30% de agua. Crudo Chichimene



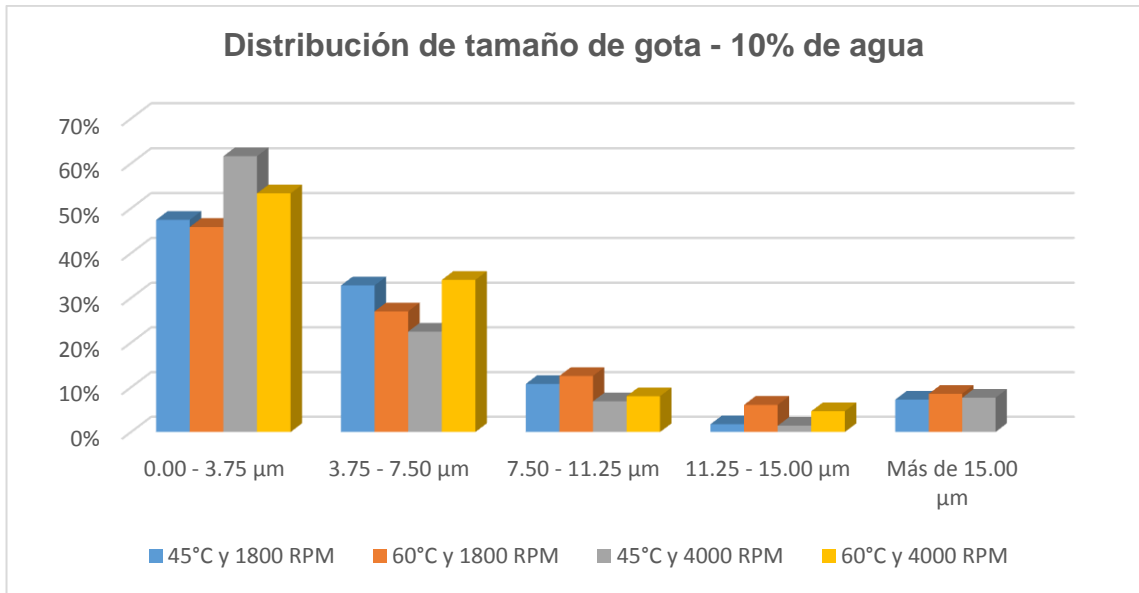
Anexo F 4. Distribución del tamaño de gota con 10% de agua. Crudo Castilla



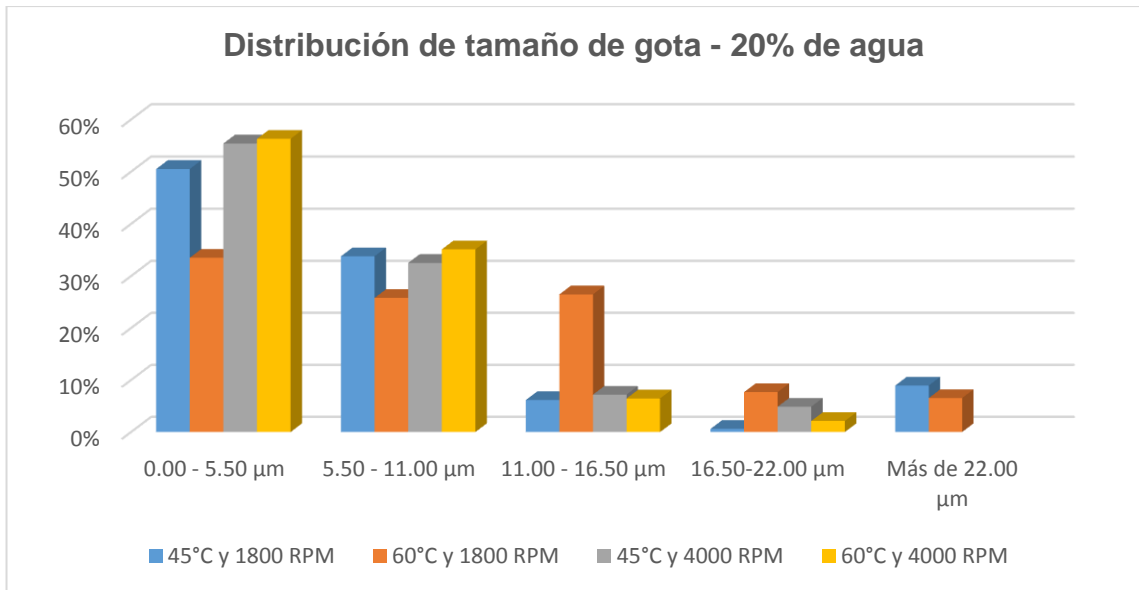
Anexo F 5. Distribución del tamaño de gota con 20% de agua. Crudo Castilla



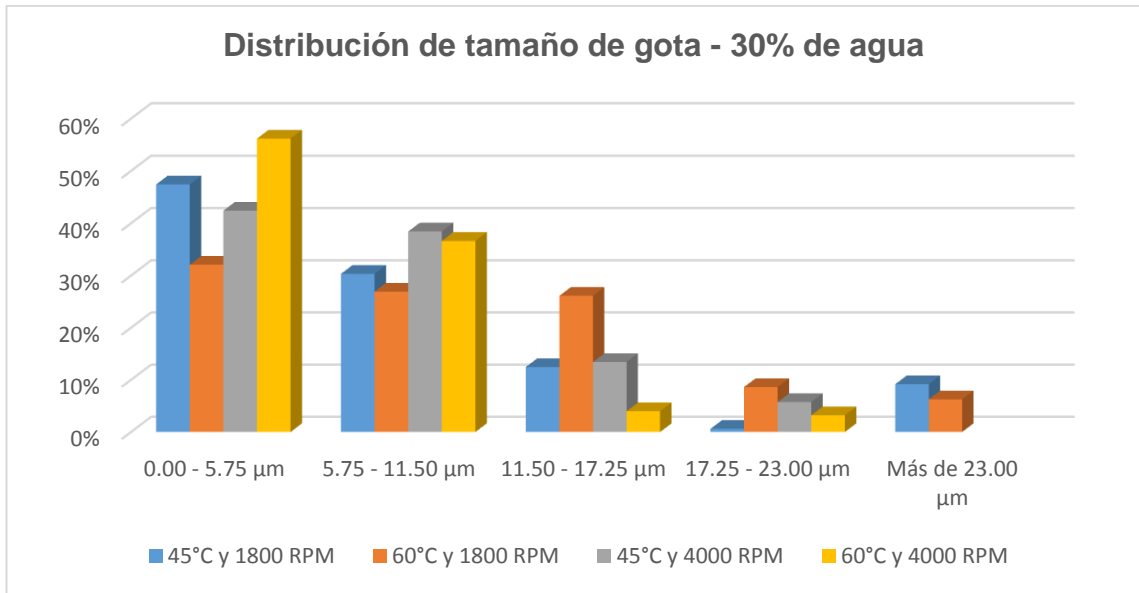
Anexo F 6. Distribución del tamaño de gota con 30% de agua. Crudo Castilla



Anexo F 7. Distribución del tamaño de gota con 10% de agua. Crudo Rubiales



Anexo F 8. Distribución del tamaño de gota con 20% de agua. Crudo Rubiales



Anexo F 9. Distribución del tamaño de gota con 30% de agua. Crudo Rubiales.

Anexo G: Tablas de efecto

Anexo G 1. Efectos del contenido de agua sobre el tamaño de gota. Crudo Chichimene.

%H ₂ O	10 % - 20%	20% - 30%	10 % - 20%	20% - 30%	
Subcódigos	01 - 05	05 - 09	02 - 06	06 - 10	
45 ° C					60 ° C
1800 RPM	↑	↑	↑	↑	1800 RPM
45 ° C					60 ° C
4000 RPM	↑	↑	↑	↑	4000 RPM
	03 - 07	07 - 11	04 - 08	08 - 12	

Anexo G 2. Efectos de la temperatura en el tamaño de gota. Crudo Chichimene.

Velocidad	%H ₂ O	45 ° C – 60 ° C	Subcódigos
1800 RPM	10%	↑	01 – 02
	20%	↑	05 – 06
	30%	↑	09 – 10
4000 RPM	10%	↑	03 - 04
	20%	↑	07 - 08
	30%	↓	11 - 12

Anexo G 3. Efectos de la velocidad de producción sobre el tamaño de gota. Crudo Chichimene

Temperatura	%H ₂ O	1800 RPM – 4000 RPM	Subcódigos
45 °C	10%	↑	01 – 03
	20%	↑	05 – 07
	30%	↑	09 – 11
60 °C	10%	↑	02 – 04
	20%	↑	06 – 08
	30%	↓	10 - 12

Anexo G 4. Efectos del contenido de agua sobre el tamaño de gota. Crudo Castilla.

%H ₂ O	10 % - 20%	20% - 30%	10 % - 20%	20% - 30%	
Subcódigos	13 - 17	17 - 21	14 - 18	18 – 22	
45 °C	↑	↑	↑	↑	60 °C
1800 RPM					1800 RPM
45 °C	↑	↑	↑	↑	60 °C
4000 RPM					4000 RPM
	15 - 19	19 - 23	16 - 20	20 – 24	









Anexo G 5. Efectos de la temperatura en el tamaño de gota. Crudo Castilla.

Velocidad	%H ₂ O	45 °C – 60 °C	Subcódigos
1800 RPM	10%	↑	13 – 14
	20%	↑	17 – 18
	30%	↑	21 - 22
4000 RPM	10%	↑	15 – 16
	20%	↑	19 - 20
	30%	↑	23 - 24







Anexo G 6. Efectos de la velocidad de producción sobre el tamaño de gota. Crudo Castilla.

Temperatura	%H ₂ O	1800 RPM – 4000 RPM	Subcódigos
45 °C	10%	↓	13 – 15
	20%	↓	17 – 19
	30%	↓	21 – 23
60 °C	10%	↓	14 – 16
	20%	↓	18 – 20
	30%	↓	22 – 24

Anexo G 7. Efectos del contenido de agua sobre el tamaño de gota. Crudo Rubiales.

%H ₂ O	10 % - 20%	20% - 30%	10 % - 20%	20% - 30%	
Subcódigos	25 - 29	29 - 33	26 - 30	30 - 34	
45 ° C					60 ° C
1800 RPM					1800 RPM
45 ° C					60 ° C
4000 RPM					4000 RPM
	27 - 31	31 - 35	28 - 32	32 - 36	

Anexo G 8. Efectos de la temperatura en el tamaño de gota. Crudo Rubiales.

Temperatura	%H ₂ O	1800 RPM – 4000 RPM	Subcódigos
45 ° C	10%		25 – 27
	20%		29 – 31
	30%		33 – 35
60 ° C	10%		26 – 28
	20%		30 – 32
	30%		34 – 36

**Anexo G 9. Efectos de la velocidad de producción sobre el tamaño de gota.
Crudo Rubiales.**

Velocidad	%H₂O	45 °C – 60 °C	Subcódigos
1800 RPM	10%	↑	25 – 26
	20%	↑	29 – 30
	30%	↑	33 – 34
4000 RPM	10%	↑	27 - 28
	20%	↑	31 – 32
	30%	↓	35 - 36

Anexo H: Índices de comportamiento reológico y esfuerzo.

Anexo H. 1. Índices de comportamiento reológico crudo Chichimene. (45°)

	τ (Esfuerzo de corte)	$\dot{\gamma}$ (Velocidad de deformación)	$y = \text{Log}(\tau)$	$x = \text{Log}(\dot{\gamma})$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E1	324.096	5	5.781	1.609	90.121	0.827
	602.880	10	6.402	2.303		
	1161.216	20	7.057	2.996		
	1648.128	30	7.407	3.401		
	1954.560	40	7.578	3.689		
	1989.888	50	7.596	3.912		
E2	210.432	5	5.349	1.609	46.558	0.936
	398.592	10	5.988	2.303		
	752.640	20	6.624	2.996		
	1173.504	30	7.068	3.401		
	1499.136	40	7.313	3.689		
	1746.432	50	7.465	3.912		
E3	274.944	5	5.617	1.609	62.549	0.930
	535.296	10	6.283	2.303		
	1039.872	20	6.947	2.996		
	1505.280	30	7.317	3.401		
	1947.648	40	7.574	3.689		
	2302.464	50	7.742	3.912		
E4	283.392	5	5.647	1.609	60.896	0.943
	499.200	10	6.213	2.303		
	1071.360	20	6.977	2.996		
	1565.952	30	7.356	3.401		
	2021.376	40	7.612	3.689		
	2304.000	50	7.742	3.912		
E5	405.504	5	6.005	1.609	113.689	0.819
	773.376	10	6.651	2.303		
	1416.960	20	7.256	2.996		
	1859.328	30	7.528	3.401		
	2181.888	40	7.688	3.689		
E6	363.264	5	5.895	1.609	115.542	0.756

	τ (Esfuerzo de corte)	γ (Velocidad de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	676.608	10	6.517	2.303		
	1234.176	20	7.118	2.996		
	1623.522	30	7.392	3.401		
	1755.648	40	7.471	3.689		
	2075.136	50	7.638	3.912		
	360.192	5	5.887	1.609		
	668.160	10	6.505	2.303		
E7	1220.352	20	7.107	2.996	122.216	0.729
	1630.464	30	7.397	3.401		
	1912.320	40	7.556	3.689		
	1697.280	50	7.437	3.912		
	403.968	5	6.001	1.609		
	748.800	10	6.618	2.303		
E8	1376.256	20	7.227	2.996	139.031	0.720
	1775.616	30	7.482	3.401		
	1985.280	40	7.594	3.689		
	1972.992	50	7.587	3.912		
	519.168	5	6.252	1.609		
	896.256	10	6.798	2.303		
E9	1401.600	20	7.245	2.996	1894.564	-0.393
	1139.712	30	7.039	3.401		
	546.048	40	6.303	3.689		
	99.840	50	4.604	3.912		
	460.032	5	6.131	1.609		
	801.024	10	6.686	2.303		
E10	960.768	20	6.868	2.996	319.411	0.315
	770.304	30	6.647	3.401		
	874.752	40	6.774	3.689		
	1250.304	50	7.131	3.912		
	546.816	5	6.304	1.609		
	968.448	10	6.876	2.303		
E11	1492.992	20	7.309	2.996	2280.588	-0.424
	1756.416	30	7.471	3.401		
	926.208	40	6.831	3.689		
	55.296	50	4.013	3.912		
	301.056	5	5.707	1.609		
E12	549.888	10	6.310	2.303	105.192	0.709

τ (Esfuerzo de corte)	γ (Velocidad de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
998.400	20	6.906	2.996		
1304.832	30	7.174	3.401		
1479.168	40	7.299	3.689		
1398.528	50	7.243	3.912		

Anexo H. 2. Índices de comportamiento reológico crudo Castilla. (45°)

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E13	13.056	5	2.569	1.609	2.839	0.949
	25.344	10	3.233	2.303		
	48.384	20	3.879	2.996		
	71.424	30	4.269	3.401		
	94.464	40	4.548	3.689		
	115.968	50	4.753	3.912		
E14	12.749	5	2.545	1.609	2.843	0.934
	24.422	10	3.195	2.303		
	46.541	20	3.840	2.996		
	68.506	30	4.227	3.401		
	89.165	40	4.490	3.689		
	108.902	50	4.690	3.912		
E15	11.750	5	2.464	1.609	2.687	0.921
	22.426	10	3.110	2.303		
	43.162	20	3.765	2.996		
	62.054	30	4.128	3.401		
	80.102	40	4.383	3.689		
	97.766	50	4.583	3.912		
E16	11.366	5	2.431	1.609	2.385	0.962
	21.427	10	3.065	2.303		
	42.547	20	3.751	2.996		
	62.970	30	4.143	3.401		
	83.098	40	4.420	3.689		
	103.066	50	4.635	3.912		
E17	29.184	5	3.374	1.609	7.727	0.797
	46.080	10	3.830	2.303		
	82.176	20	4.409	2.996		

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	115.968	30	4.753	3.401		
	147.456	40	4.994	3.689		
	179.712	50	5.191	3.912		
	13.056	5	2.569	1.609		
	24.576	10	3.202	2.303		
E18	47.002	20	3.850	2.996	2.954	0.923
	68.352	30	4.225	3.401		
	89.011	40	4.489	3.689		
	108.442	50	4.686	3.912		
	19.738	5	2.983	1.609		
	37.555	10	3.626	2.303		
E19	68.966	20	4.234	2.996	4.789	0.887
	96.461	30	4.569	3.401		
	125.414	40	4.832	3.689		
	155.059	50	5.044	3.912		
	18.048	5	2.893	1.609		
	29.414	10	3.381	2.303		
E20	57.293	20	4.048	2.996	4.075	0.889
	83.866	30	4.429	3.401		
	109.978	40	4.700	3.689		
	135.014	50	4.905	3.912		
	27.802	5	3.325	1.609		
	62.515	10	4.135	2.303		
E21	117.043	20	4.763	2.996	6.181	0.972
	166.963	30	5.118	3.401		
	214.195	40	5.367	3.689		
	11.597	5	2.451	1.609		
	22.480	10	3.113	2.303		
E22	42.624	20	3.752	2.996	2.600	0.933
	62.362	30	4.133	3.401		
	81.331	40	4.399	3.689		
	99.533	50	4.600	3.912		
	27.034	5	3.297	1.609		
	49.536	10	3.903	2.303		
E23	92.544	20	4.528	2.996	6.430	0.890
	132.250	30	4.885	3.401		
	171.181	40	5.143	3.689		

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	209.203	50	5.343	3.912		
E24	30.566	5	3.420	1.609	7.834	0.857
	56.832	10	4.040	2.303		
	104.755	20	4.652	2.996		
	147.072	30	4.991	3.401		
	185.242	40	5.222	3.689		
	217.651	50	5.383	3.912		

Anexo H. 3. Índices de comportamiento reológico crudo Rubiales. (45°)

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E25	6.605	5	1.888	1.609	1.410	0.971
	13.440	10	2.598	2.303		
	26.112	20	3.262	2.996		
	38.400	30	3.648	3.401		
	50.381	40	3.920	3.689		
	62.208	50	4.130	3.912		
E26	5.914	5	1.777	1.609	1.226	0.984
	11.981	10	2.483	2.303		
	23.347	20	3.150	2.996		
	34.637	30	3.545	3.401		
	46.157	40	3.832	3.689		
	57.446	50	4.051	3.912		
E27	7.680	5	2.039	1.609	1.722	0.929
	14.592	10	2.680	2.303		
	27.955	20	3.331	2.996		
	40.704	30	3.706	3.401		
	53.146	40	3.973	3.689		
	64.973	50	4.174	3.912		
E28	5.299	5	1.668	1.609	1.050	1.013
	10.982	10	2.396	2.303		
	21.811	20	3.082	2.996		
	33.024	30	3.497	3.401		
	43.930	40	3.783	3.689		
	54.912	50	4.006	3.912		
E29	9.754	5	2.278	1.609	2.152	0.945

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	19.223	10	2.956	2.303		
	36.710	20	3.603	2.996		
	53.683	30	3.983	3.401		
	70.349	40	4.253	3.689		
	86.400	50	4.459	3.912		
	8.678	5	2.161	1.609		
	16.819	10	2.823	2.303		
E30	32.486	20	3.481	2.996	1.847	0.959
	48.077	30	3.873	3.401		
	63.744	40	4.155	3.689		
	79.104	50	4.371	3.912		
	10.982	5	2.396	1.609		
	19.584	10	2.975	2.303		
E31	37.171	20	3.616	2.996	2.526	0.901
	54.298	30	3.994	3.401		
	70.502	40	4.256	3.689		
	85.939	50	4.454	3.912		
	7.142	5	1.966	1.609		
	14.746	10	2.691	2.303		
E32	30.182	20	3.407	2.996	1.415	1.015
	44.851	30	3.803	3.401		
	59.366	40	4.084	3.689		
	73.958	50	4.303	3.912		
	15.667	5	2.752	1.609		
	30.106	10	3.405	2.303		
E33	57.984	20	4.060	2.996	3.508	0.933
	84.480	30	4.437	3.401		
	109.363	40	4.695	3.689		
	133.939	50	4.897	3.912		
	8.755	5	2.170	1.609		
	16.896	10	2.827	2.303		
E34	33.869	20	3.523	2.996	1.815	0.975
	50.227	30	3.917	3.401		
	66.048	40	4.190	3.689		
	81.792	50	4.404	3.912		
	15.514	5	2.742	1.609		
E35	30.720	10	3.425	2.303	3.717	0.907
	57.907	20	4.059	2.996		

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E36	82.099	30	4.408	3.401	2.346	0.992
	103.987	40	4.644	3.689		
	126.106	50	4.837	3.912		
	11.290	5	2.424	1.609		
	23.654	10	3.164	2.303		
	46.694	20	3.844	2.996		
	68.890	30	4.233	3.401		
	90.547	40	4.506	3.689		
	111.974	50	4.718	3.912		

Anexo H. 4. Índices de comportamiento reológico crudo Chichimene. (60°)

	τ (Esfuerzo de corte)	γ (Velocidad de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E01	81.408	5	4.399	1.609	18.245	0.922
	149.760	10	5.009	2.303		
	288.768	20	5.666	2.996		
	420.096	30	6.040	3.401		
	552.192	40	6.314	3.689		
	670.469	50	6.508	3.912		
E02	66.048	5	4.190	1.609	13.297	0.968
	114.432	10	4.740	2.303		
	248.832	20	5.517	2.996		
	350.976	30	5.861	3.401		
	478.464	40	6.171	3.689		
	592.128	50	6.384	3.912		
E03	59.136	5	4.080	1.609	12.358	0.971
	115.200	10	4.747	2.303		
	225.024	20	5.416	2.996		
	334.080	30	5.811	3.401		
	450.832	40	6.111	3.689		
	546.816	50	6.304	3.912		
E04	62.976	5	4.143	1.609	13.569	0.956
	123.648	10	4.817	2.303		
	238.080	20	5.473	2.996		
	350.208	30	5.859	3.401		
	463.104	40	6.138	3.689		

	τ (Esfuerzo de corte)	γ (Velocidad de deformación)	$y = \text{Log}(\tau)$	$x = \text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	571.392	50	6.348	3.912		
E05	92.160	5	4.524	1.609	19.825	0.953
	177.408	10	5.178	2.303		
	343.296	20	5.839	2.996		
	509.184	30	6.233	3.401		
	668.928	40	6.506	3.689		
	823.296	50	6.713	3.912		
E06	92.928	5	4.532	1.609	19.989	0.994
	211.968	10	5.356	2.303		
	405.504	20	6.005	2.996		
	592.128	30	6.384	3.401		
	771.072	40	6.648	3.689		
	944.640	50	6.851	3.912		
E07	75.264	5	4.321	1.609	16.466	0.941
	142.848	10	4.962	2.303		
	274.944	20	5.617	2.996		
	407.040	30	6.009	3.401		
	532.224	40	6.277	3.689		
	652.032	50	6.480	3.912		
E08	73.728	5	4.300	1.609	15.771	0.999
	170.496	10	5.139	2.303		
	323.328	20	5.779	2.996		
	474.624	30	6.163	3.401		
	620.544	40	6.431	3.689		
	761.856	50	6.636	3.912		
E09	96.768	5	4.572	1.609	23.364	0.890
	184.320	10	5.217	2.303		
	330.240	20	5.800	2.996		
	494.562	30	6.204	3.401		
	625.152	40	6.438	3.689		
	744.960	50	6.613	3.912		
E10	139.008	5	4.935	1.609	37.535	0.831
	254.976	10	5.541	2.303		
	470.784	20	6.154	2.996		
	658.944	30	6.491	3.401		
	812.544	40	6.700	3.689		
	907.008	50	6.810	3.912		

	τ (Esfuerzo de corte)	γ (Velocidad de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E11	125.184	5	4.830	1.609	31.774	0.874
	240.384	10	5.482	2.303		
	456.960	20	6.125	2.996		
	645.120	30	6.469	3.401		
	784.128	40	6.665	3.689		
	923.136	50	6.828	3.912		
E12	132.096	5	4.884	1.609	35.713	0.822
	239.616	10	5.479	2.303		
	424.704	20	6.051	2.996		
	594.432	30	6.388	3.401		
	741.120	40	6.608	3.689		
	871.680	50	6.770	3.912		

Anexo H. 5. Índices de comportamiento reológico crudo Castilla. (60°)

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
E13	6.144	5	1.815	1.609	1.529	0.821
	9.216	10	2.221	2.303		
	17.664	20	2.872	2.996		
	25.344	30	3.233	3.401		
	31.488	40	3.450	3.689		
	39.168	50	3.668	3.912		
E14	5.299	5	1.668	1.609	1.230	0.896
	9.446	10	2.246	2.303		
	17.971	20	2.889	2.996		
	25.728	30	3.248	3.401		
	33.562	40	3.513	3.689		
	41.395	50	3.723	3.912		
E15	3.763	5	1.325	1.609	0.865	0.910
	6.989	10	1.944	2.303		
	13.210	20	2.581	2.996		
	18.970	30	2.943	3.401		
	24.883	40	3.214	3.689		
	30.566	50	3.420	3.912		
E16	4.070	5	1.404	1.609	0.901	0.945
	8.141	10	2.097	2.303		

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	15.130	20	2.717	2.996		
	22.195	30	3.100	3.401		
	29.261	40	3.376	3.689		
	36.557	50	3.599	3.912		
	16.896	5	2.827	1.609		
	22.272	10	3.103	2.303		
E17	32.256	20	3.474	2.996	6.966	0.522
	39.936	30	3.687	3.401		
	48.384	40	3.879	3.689		
	56.064	50	4.026	3.912		
	7.142	5	1.966	1.609		
	12.595	10	2.533	2.303		
E18	23.270	20	3.147	2.996	1.725	0.872
	33.715	30	3.518	3.401		
	43.392	40	3.770	3.689		
	52.454	50	3.960	3.912		
	5.914	5	1.777	1.609		
	12.058	10	2.490	2.303		
E19	22.579	20	3.117	2.996	1.317	0.948
	33.024	30	3.497	3.401		
	43.392	40	3.770	3.689		
	53.146	50	3.973	3.912		
	5.683	5	1.737	1.609		
	11.443	10	2.437	2.303		
E20	22.579	20	3.117	2.996	1.196	0.976
	33.254	30	3.504	3.401		
	43.699	40	3.777	3.689		
	53.914	50	3.987	3.912		
	8.832	5	2.178	1.609		
	16.358	10	2.795	2.303		
E21	28.954	20	3.366	2.996	2.425	0.820
	39.936	30	3.687	3.401		
	49.690	40	3.906	3.689		
	58.291	50	4.065	3.912		
	8.294	5	2.116	1.609		
E22	14.899	10	2.701	2.303	2.333	0.801
	26.266	20	3.268	2.996		
	36.250	30	3.590	3.401		

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	44.928	40	3.805	3.689		
	51.686	50	3.945	3.912		
E23	6.758	5	1.911	1.609	1.561	0.918
	13.056	10	2.569	2.303		
	24.576	20	3.202	2.996		
	35.635	30	3.573	3.401		
	46.080	40	3.830	3.689		
	55.910	50	4.024	3.912		
	12.211	5	2.502	1.609		
23.424	10	3.154	2.303			
44.093	20	3.786	2.996			
61.517	30	4.119	3.401			
79.334	40	4.374	3.689			
96.461	50	4.569	3.912			

Anexo H. 6. Índices de comportamiento reológico crudo Rubiales. (60°)

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	2.381	5	0.868	1.609		
	4.224	10	1.441	2.303		
	8.525	20	2.143	2.996		
	12.518	30	2.527	3.401		
	16.819	40	2.823	3.689		
E25	20.890	50	3.039	3.912	0.495	0.953
	5.222	10	1.653	2.303		
	8.755	20	2.170	2.996		
	13.210	30	2.581	3.401		
	17.357	40	2.854	3.689		
	21.658	50	3.075	3.912		
E26	25.882	60	3.254	4.094	0.623	0.904
	2.995	5	1.097	1.609		
	5.376	10	1.682	2.303		
	9.293	20	2.229	2.996		
	13.286	30	2.587	3.401		
	17.357	40	2.854	3.689		
E27	21.274	50	3.057	3.912	0.760	0.846
E28	1.920	5	0.652	1.609	0.367	1.032

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	3.917	10	1.365	2.303		
	8.294	20	2.116	2.996		
	12.288	30	2.509	3.401		
	16.435	40	2.799	3.689		
	20.506	50	3.021	3.912		
	2.918	5	1.071	1.609		
	6.067	10	1.803	2.303		
	11.443	20	2.437	2.996		
	17.357	30	2.854	3.401		
	23.040	40	3.137	3.689		
E29	28.046	50	3.334	3.912	0.614	0.980
	3.610	5	1.284	1.609		
	6.067	10	1.803	2.303		
	12.134	20	2.496	2.996		
	17.818	30	2.880	3.401		
	23.654	40	3.164	3.689		
E30	29.261	50	3.376	3.912	0.775	0.923
	4.147	5	1.422	1.609		
	7.219	10	1.977	2.303		
	12.522	20	2.527	2.996		
	18.509	30	2.918	3.401		
	24.038	40	3.180	3.689		
E31	29.491	50	3.384	3.912	1.025	0.852
	3.072	5	1.122	1.609		
	5.683	10	1.737	2.303		
	12.749	20	2.545	2.996		
	18.893	30	2.939	3.401		
	24.883	40	3.214	3.689		
E32	30.720	50	3.425	3.912	0.581	1.019
	4.762	5	1.561	1.609		
	8.986	10	2.196	2.303		
	17.587	20	2.867	2.996		
	26.573	30	3.280	3.401		
	34.790	40	3.549	3.689		
E33	43.162	50	3.765	3.912	0.997	0.962
	4.685	5	1.544	1.609		
	9.600	10	2.262	2.303		
E34	18.335	20	2.909	2.996	1.014	0.964

	τ (Esf. de corte)	γ (V de deformación)	$y=\text{Log}(\tau)$	$x=\text{Log}(\gamma)$	K (índice de consistencia)	n (índice de comportamiento)
	27.110	30	3.300	3.401		
	35.405	40	3.567	3.689		
	43.622	50	3.776	3.912		
	4.762	5	1.561	1.609		
	8.909	10	2.187	2.303		
	17.818	20	2.880	2.996		
	26.342	30	3.271	3.401		
	34.790	40	3.549	3.689		
E35	43.085	50	3.763	3.912	0.996	0.963
	4.454	5	1.494	1.609		
	9.216	10	2.221	2.303		
	18.893	20	2.939	2.996		
	28.186	30	3.339	3.401		
	36.941	40	3.609	3.689		
E36	45.542	50	3.819	3.912	0.890	1.012

Anexo I: Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias.

Anexo I 1. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Chichimene a 60 °C.

Crudo Chichimene - 60 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R²)
16027-01	0.92	18.25	0.9998
16027-02	0.97	13.30	0.9974
16027-03	0.97	12.36	0.9999
16027-04	0.96	13.57	1.0000
16027-05	0.95	19.82	1.0000
16027-06	0.99	19.99	0.9970
16027-07	0.94	16.47	0.9999
16027-08	1.00	15.77	0.9968
16027-09	0.89	23.36	0.9994
16027-10	0.83	37.54	0.9969
16027-11	0.87	31.77	0.9973
16027-12	0.82	35.71	0.9995

Anexo I 2. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Castilla a 60 °C.

Crudo Castilla - 60 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R²)
16027-13	0.82	1.53	0.9943
16027-14	0.90	1.23	0.9996
16027-15	0.91	0.87	0.9999
16027-16	0.94	0.90	0.9997
16027-17	0.52	6.97	0.9929
16027-18	0.87	1.72	0.9997
16027-19	0.95	1.32	0.9995

Crudo Castilla - 60 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R²)
16027-20	0.98	1.20	0.9998
16027-21	0.82	2.43	0.9990
16027-22	0.80	2.33	0.99900
16027-23	0.92	1.56	0.9999
16027-24	0.89	2.95	0.9996

Anexo I 3. Índices de comportamiento, consistencia y ajuste al modelo de la ley de potencias. Crudo Rubiales a 60 °C.

Crudo Rubiales - 60 °C			
Emulsión	Índice de comportamiento (n)	Índice de consistencia (k)	Ajuste al modelo (R²)
16027-25	0.95	0.49	0.9988
16027-26	0.90	0.62	0.9958
16027-27	0.85	0.76	0.9993
16027-28	1.03	0.37	0.9998
16027-29	0.98	0.61	0.9995
16027-30	0.92	0.78	0.9975
16027-31	0.85	1.02	0.9985
16027-32	1.02	0.58	0.9983
16027-33	0.96	1.00	0.9998
16027-34	0.96	1.01	0.9996
16027-35	0.96	1.00	0.9998
16027-36	0.89	1.01	0.9996