



**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA FASE DISPERSA SOBRE LA  
REOLOGÍA DE EMULSIÓN DIRECTA DE UN CRUDO PESADO POR MEDIO DE  
PRUEBAS DE LABORATORIO Y MICROSCOPIA ÓPTICA**

**LIZETH MAYERLY CASTELLANOS ARCINIEGAS  
LUZ AMPARO OSORIO MARTÍNEZ**

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

**2017**



**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA FASE DISPERSA SOBRE LA  
REOLOGÍA DE EMULSIÓN DIRECTA DE UN CRUDO PESADO POR MEDIO DE  
PRUEBAS DE LABORATORIO Y MICROSCOPIA ÓPTICA**

**LIZETH MAYERLY CASTELLANOS ARCINIEGAS  
LUZ AMPARO OSORIO MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
INGENIERA DE PETRÓLEOS**

**Director**

**EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS  
M.Sc. En Gerencia de Hidrocarburos**

**Codirector**

**ANDRÉS FELIPE ORTIZ MENESES  
Ingeniero de Petróleos**

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

**2017**

## DEDICATORIAS

Primeramente, a DIOS por brindarme la oportunidad de llegar hasta donde estoy el día de hoy, por ser mi guía, mi sostén y fortaleza, por las bendiciones recibidas, por darme la sabiduría y entendimiento para alcanzar un triunfo más en mi vida.

A mi padre Herman A. Castellanos R. por ser mi motor, mi apoyo, mi fuerza, mi motivación, mi cómplice; el ser que me ha dado todo, quien me ha enseñado los valores para formar la mujer que soy, por estar presente en cada una de mis etapas y brindarme su amor incondicional sin importar los obstáculos. Eres quien da sentido a mi vida, quedo corta al expresar todo lo que significas para mí. ¡Gracias papi, te amo! Esto es por ti.

A mi madre Myriam I. Arciniegas J. la que trasnochaba conmigo en cada oportunidad y atendía a mis amigos como parte de apoyo al esfuerzo de salir adelante y recalcaros que “todo sacrificio trae su recompensa”.

A mi hermano Sebastián Castellanos porque con su alma de niño me ha dejado un sinfín de enseñanzas, lo quiero mucho morsa.

A mi compañera de tesis, Luz Amparo Osorio, por brindarme su amistad durante toda la carrera desde el primer día, brindándome su apoyo, compañía y conocimiento; por aguantarme mis locuras y bromas. ¡Gracias por la confianza depositada mi hermana adoptiva!

A mis amigos del alma Eliana Carolina Jaimes, Alejandra Carreño y Alejo Murcia, más que amigos son mis hermanos del alma, que están pendientes de mí en toda situación, por sus sabios consejos y también los regaños, gracias por protegerme tanto y consentirme.

A los demás familiares y amigos que de una u otra forma han estado presentes en mi camino y han llenado de alegría mi vida. Gracias Totales.

***Lizeth Mayerly Castellanos Arciniegas***

A DIOS por levantarme después de cada tropiezo, por bendecirme día con día regalándome la fuerza necesaria para alcanzar cada uno de mis sueños, por darme sabiduría, inteligencia y paciencia cada vez que lo necesito, porque a ÉL le debo todo.

A mi madre Nerys A. Martínez por ser mi motor y mi apoyo incondicional, por ser quien me motiva cada vez que siento que algo va mal, por ser quien me alienta a seguir el camino en busca de lo que quiero, gracias por su amor durante todos estos años, por dedicar su vida entera a nosotros, este logro le pertenece. ¡Gracias por toda mami! porque mis sueños nunca han sido solo míos, siempre han sido nuestros. Gracias por ser el gran amor de mi vida.

A mi padre Francisco Osorio por su apoyo siempre, por mostrarme que siempre está ahí para mí y que puedo contar con él, por enseñarme tanto, por darme fuerza día tras día y hacerme saber el lugar que ocupo en su corazón.

A mi hermano Roberto Carlos Osorio M. por ser mi espejo hoy y siempre, por ser tan paciente conmigo y motivarme a ser mejor persona día con día, por su amor incondicional.

A mi compañera de tesis Lizeth Mayerly Castellanos A. Por su apoyo incondicional durante tantos años, por su amistad de hoy y siempre, por su paciencia y dedicación desde el primer día y durante cada segundo de este proceso. ¡Hermanas siempre!

A mi familia por sus consejos, oraciones y demás demostraciones de cariño, afecto y apoyo durante todo este ciclo. ¡Muchas gracias!

A la familia Castellanos Arciniegas por haberme adoptado en su hogar y tratarme como si fuese en verdad parte de la familia, por su apoyo desde el principio, Muchas gracias!

***Luz Amparo Osorio Martínez.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras de este proyecto de grado ofrecen de manera formal y con gratitud los más sinceros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander sede principal y sede Málaga, por brindarnos la oportunidad de pertenecer a tan prestigiosa entidad.

La escuela Ingeniería de Petróleos y con ella todo el ramillete de docentes que nos transmitieron sus conocimientos y experiencias para darnos la oportunidad de formarnos como profesionales.

Grupo Modelamiento de Procesos Hidrocarburos, por la oportunidad de aprender del grupo de investigación y todos sus participantes, por sus correcciones y recomendaciones.

M.Sc. Edison O. García Navas, director de este proyecto, por estar pendiente, por el apoyo, orientación, ayuda y exigencia.

M.Sc. Erik Montes y César Pineda por las recomendaciones y aportes realizados para que este proyecto saliera exitoso.

Ing. Andrés Felipe Ortiz Meneses, codirector del proyecto, por su compromiso y respaldo en el desarrollo del proyecto.

Al ingeniero Javier Cordero por el tiempo de acompañamiento en la tesis, su esfuerzo, apoyo y dedicación.

Al laboratorio de microscopía y al físico Carlos Chacón por su disposición y dedicación, quien en esta área fue un gran colaborador.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. TEORÍA DE EMULSIONES .....	19
1.1 GENERALIDADES .....	19
1.2 COMPOSICIÓN DE EMULSIONES.....	21
1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES .....	21
1.3.1 Según la fase continua de la emulsión .....	22
1.3.2 según el grado de estabilidad .....	22
1.3.3 Según el grado de rompimiento.....	22
1.4 FORMACIÓN DE EMULSIONES.....	22
1.4.1 Agentes emulsificantes .....	23
1.5 ESTABILIDAD DE EMULSIONES .....	23
1.5.1 Factores que afectan la estabilidad .....	25
1.6 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA .....	26
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	27
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	27
2.2 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO .....	28
2.2.1 Identificación de las variables .....	28
2.2.2 Recursos y materiales disponibles.....	29
2.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.....	34
3. TÉCNICAS AVANZADAS DE IMÁGENES Y ESTADÍSTICA.....	36
3.1 OBTENCIÓN DE IMÁGENES.....	37
3.2 METODOLOGÍA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	42
3.3 ESTADÍSTICA APLICADA.....	48
3.3.1 Media aritmética.....	48
3.3.2 Desviación estándar .....	48
3.3.3 Distribución normal .....	48
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
4.1 EMULSIÓN 50 RPM SIN ROMPEDOR .....	49
4.2 EMULSIÓN 50 RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR .....	53

4.3 EMULSIÓN 50 RPM CONCENTRACIÓN MAYOR DE SEPARADOR .....	56
4.4 EMULSIÓN 500RPM SIN ROMPEDOR .....	60
4.5 EMULSIÓN 500RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR .....	63
4.6 EMULSIÓN 500RPM CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR .....	66
4.7 EMULSIÓN 1000RPM SIN ROMPEDOR .....	70
4.8 EMULSIÓN 1000RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR .....	72
4.9 EMULSIÓN 1000RPM CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR .....	76
4.10 ANÁLISIS ESTADO LIMPIO SIN ROMPEDOR .....	80
4.11 ANÁLISIS ESTADO A CONCENTRACIÓN DE SEPARADOR .....	81
4.12 ANÁLISIS ESTADO CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR .....	82
5. CONCLUSIONES .....	84
BIBLIOGRAFÍA .....	86

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA FASE DISPERSA SOBRE LA REOLOGÍA DE EMULSION DIRECTA DE UN CRUDO PESADO POR MEDIO DE PRUEBAS DE LABORATORIO Y MICROSCOPIA ÓPTICA.\*

**AUTORES:** LIZETH MAYERLY CASTELLANOS ARCINIEGAS  
LUZ AMPARO OSORIO MARTÍNEZ \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Reología, Emulsión, Tamaño de Gota, Pruebas de Laboratorio, Microscopía Óptica.

### DESCRIPCIÓN

El incremento en la producción de crudos con altos cortes de agua, el aumento en los problemas para el manejo de las emulsiones generadas por los fluidos producidos en los campos petroleros y la dificultad para su producción, transporte, separación y tratamiento requerido para llevarlos a las condiciones de venta y/o transporte se manifiestan de diferentes formas y están asociados ya sea a las características del crudo o a otros factores como la presencia de agentes emulsificantes, presencia de sólidos y el tamaño de la gota de la fase dispersa. El conocimiento sobre el comportamiento y manejo de la estabilidad de las emulsiones resulta una necesidad importante tanto para su transporte por tuberías como en las actividades de deshidratación debido a que una alta estabilidad puede generar mayores dificultades en estas operaciones.

De acuerdo a lo anterior se evidencia la necesidad de realizar y profundizar en estudios que aborden temas como la caracterización de emulsiones basados en el concepto de tamaño de gota y su relación con el comportamiento reológico, de tal forma que permita abrir las puertas a la implementación de mejoras o creación de nuevos métodos que optimicen los procesos de transporte y tratamiento de crudo.

Por otro lado, el diseño de experimentos y el uso del análisis estadístico se convierten en herramientas claves que permiten facilitar la identificación de características únicas de las muestras evaluadas y la comparación entre las mismas definiendo tendencias que permitieron la agrupación de datos, lo que fue de gran ayuda a la hora de realizar el análisis de los datos obtenidos y su validación mediante comparación con la información disponible en la literatura lo que permitió además encontrar nuevas conclusiones para el tratamiento de las emulsiones.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas, Codirector: Ing. Andrés Felipe Ortiz Meneses.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE EFFECTS OF THE DISPERSED PHASE ON THE RHEOLOGY OF DIRECT EMULSION OF HEAVY OIL BY LAB TESTS AND OPTICAL MICROSCOPY. \*

**AUTHORS:** LIZETH MAYERLY CASTELLANOS ARCINIEGAS  
LUZ AMPARO OSORIO MARTÍNEZ \*\*

**KEY WORDS:** Rheology, Emulsion, Drop Size, Lab Tests, Optical Microscopy.

## DESCRIPTION

The increase of the oil crude with high water cut, the increase of problems with management emulsions generated by produced fluids in oil fields and the difficulty for their production, transport, separation and treatment to bring the fluids to the requirement of sale or disposition settled in surface operations manifest in different ways and are associate to either oil crude characteristics or external factors as presence of natural emulsifying agents and external additives, presence of solids and drop size in the disperse phase. The knowledge about emulsion management and behavior is an important necessity for pipeline transportation and dehydration activities because a high stability could create difficulties in the water separation process.

With what we just said, we can to evidence the necessity that exists of doing studies that treat subjects as emulsion characterization based on drop size concept and its relation with the rheological behaving to open doors to the improvements implementation or creating new methods that improve oil transportation processes and oil crude treatment.

To the other side, the experiments design and use of statistical analysis turn into key tools that make easier the identification of unique characteristics of evaluated samples and comparison between them, defining trends that help to group data, what was of great help to do the data analysis and its validation with available information what helped to find some conclusions for the field emulsions treatment.

On the other hand, the design of experiments and the use of statistical analysis become tools that allow the identification of unique characteristics of the evaluated samples and the comparison between the same defining trends that allowed the grouping of data, which was of great help At the time of the analysis of the data obtained and its validation of the information available in the literature which also allowed to find some conclusions for the treatment of the emulsions in the field.

---

\* Grade Project.

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas, Codirector: P.E. Andrés Felipe Ortiz Meneses.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Fig. 1 Tipos de emulsión	20
Fig. 2 Microscopio Axio Imager Z1m	30
Fig. 3 Fuente de luz externa	30
Fig. 4 Hidrómetro	31
Fig. 5 Muestras	32
Fig. 6 Viscosímetro Saybolt	32
Fig. 7 Viscosímetro OFITE Model 90	33
Fig. 8 Baño de temperatura	34
Fig. 9 Panel de visualización software, toma de imágenes	37
Fig. 10 Submenú, módulo de imágenes en vivo	38
Fig. 11 Submenú corrección del color, módulo de imágenes en vivo	39
Fig. 12 Submenú de calibración de imágenes, módulo de imágenes en vivo	40
Fig. 13 Submenú toma de imágenes, módulo de imágenes en vivo	41
Fig. 14 Imagen emulsión w/o con escala en ImageJ – Fiji	42
Fig. 15 Resultado del proceso de color deconvolution	43
Fig. 16 Imagen 8 bit en tonalidades rojas	44
Fig. 17 Imagen aplicando threshold	45
Fig. 18 Imagen binaria	46
Fig. 19 Imagen binaria aplicando analyze particles	46
Fig. 20 Resultados del analyze particles	47
Fig. 21 Emulsión 50 rpm sin rompedor	50
Fig. 22 Imagen binaria emulsión 50 rpm sin rompedor	50
Fig. 23 Emulsión 50 rpm sin rompedor	51
Fig. 24 Imagen binaria emulsión 50 rpm sin rompedor	51
Fig. 25 Emulsión 50 rpm concentración de separador	53

Fig. 26 Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración de separador	53
Fig. 27 Emulsión 50 rpm concentración de separador	54
Fig. 28 Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración de separador	54
Fig. 29 Emulsión 50 rpm concentración mayor de separador	56
Fig. 30 Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración mayor de separador	56
Fig. 31 Emulsión 50 rpm concentración mayor de separador	57
Fig. 32 Imagen binaria emulsión 50 rpm sin rompedor	57
Fig. 33 Emulsión 500 rpm sin rompedor	60
Fig. 34 Imagen binaria emulsión 500 rpm sin rompedor	60
Fig. 35 Emulsión 500 rpm sin rompedor	61
Fig. 36 Imagen binaria emulsión 500 rpm sin rompedor	61
Fig. 37 Emulsión 500 rpm concentración de separador	63
Fig. 38 Imagen binaria emulsión 500 rpm concentración de separador	63
Fig. 39 Emulsión 500 rpm concentración de separador	64
Fig. 40 Imagen binaria emulsión 500 rpm concentración de separador	64
Fig. 41 Emulsión 500 rpm concentración mayor que separador	66
Fig. 42 Imagen binaria emulsión 500 rpm concentración mayor que separador	66
Fig. 43 Emulsión 500 rpm concentración mayor que separador	67
Fig. 44 Imagen binaria emulsión 500 rpm concentración mayor que separador	67
Fig. 45 Emulsión 1000 rpm sin rompedor	70
Fig. 46 Imagen binaria emulsión 1000 rpm sin rompedor	70
Fig. 47 Emulsión 1000 rpm sin rompedor	71
Fig. 48 Imagen binaria emulsión 1000 rpm sin rompedor	71
Fig. 49 Emulsión 1000 rpm concentración separador	73
Fig. 50 Imagen binaria emulsión 1000 rpm concentración de separador	73
Fig. 51 Emulsión 1000 rpm concentración separador	74
Fig. 52 Imagen binaria emulsión 1000 rpm concentración separador	74

Fig. 53 Emulsión 1000 rpm concentración mayor que separador	76
Fig. 54 Imagen binaria emulsión 1000 rpm concentración mayor que separador	76
Fig. 55 Emulsión 1000 rpm concentración mayor que separador	77
Fig. 56 Imagen binaria emulsión 1000 rpm concentración mayor que separador	77

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Distribución normal 50 rpm sin rompedor	52
Gráfica 2. Distribución normal 50 rpm concentración separador	55
Gráfica 3. Distribución normal emulsión 50 rpm concentración mayor	58
Gráfica 4. Distribuciones normales de 50 rpm	59
Gráfica 5. Distribución normal 500 rpm limpio	62
Gráfica 6. Distribución normal emulsión 500rpm concentración separador	65
Gráfica 7. Distribución normal emulsión 500rpm concentración mayor	68
Gráfica 8. Distribuciones normales 500 rpm	69
Gráfica 9. Distribución normal emulsión 1000rpm sin rompedor	72
Gráfica 10. Distribución normal emulsión 1000rpm concentración	75
Gráfica 11. Distribución normal emulsión 1000rpm concentración	78
Gráfica 12. Distribución normal 1000 rpm a diferentes concentraciones	79
Gráfica 13. Distribución normal sin rompedor a diferentes revoluciones	80
Gráfica 14. Distribución normal concentración de separador	81
Gráfica 15. Distribución normal concentración mayor que separador	82

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diseño experimental de las pruebas en laboratorio	29
Tabla 2. Especificaciones de escenario y concentración	49
Tabla 3. Caracterización crudo líneas base	49
Tabla 4. Diámetro promedio con cada una de las concentraciones	59
Tabla 5. Promedio de diámetros a diferentes concentraciones	69
Tabla 6. Promedio de diámetros a diferentes concentraciones de rompedor	79
Tabla 7. Diámetros a diferentes velocidades de agitación de la emulsión	80
Tabla 8. Promedio de diámetros a diferentes velocidades de agitación	81
Tabla 9. Promedio de diámetros a diferentes velocidades de agitación	82

## INTRODUCCIÓN

Los problemas que se presentan en superficie para el transporte y tratamiento asociado a la producción de crudos pesados y extra pesados son cada vez más frecuentes, estos se manifiestan de diferentes formas y están ligados ya sea a las características del crudo o factores externos a éste, uno de ellos está relacionado a las emulsiones. La estabilidad de emulsiones resulta una necesidad para su transporte por tuberías, pero una alta estabilidad crea dificultades posteriores en las operaciones de separación del agua, por eso se ve la necesidad de realizar estudios a profundidad sobre el comportamiento de emulsiones agua-aceite; el evaluar los efectos del tamaño de gota en este tipo de emulsiones presenta la oportunidad de diseñar nuevos métodos para el manejo de este tipo de inconvenientes o ayudar a mejorar los hasta ahora existentes.

En este trabajo se proporciona información teórica, sobre emulsiones, características, clasificación y estabilidad de las mismas; además se describe el diseño experimental y la planeación de la investigación, junto con el proceso de ejecución detallado mediante el cual se desarrollaron las pruebas de laboratorio y microscopía, además, se hace una descripción de las técnicas avanzadas para el procesamiento de imágenes utilizadas para la identificación de la distribución y tamaño de gotas dispersas, y por último, se presenta el análisis de los resultados obtenidos para posteriormente realizar una evaluación basados en la literatura existente.

## 1. TEORÍA DE EMULSIONES<sup>1</sup>

Una emulsión es un sistema heterogéneo de dos fluidos líquidos inmiscibles en el cual uno de los fluidos está disperso en forma de pequeñas gotas constituyendo una única fase.<sup>2</sup>

La emulsión es diferenciada de una simple dispersión de fluidos debido a que la probabilidad de coalescencia de las partículas en contacto es notablemente menor por la presencia de un agente emulsificador, tal inhibición no está presente durante la dispersión.

Dos terceras partes de los crudos del mundo se producen en forma de emulsión. Tales crudos se producen principalmente como emulsiones de agua en aceite más que como emulsiones aceite en agua debido a los fenómenos ocurrientes durante la producción.<sup>3 4</sup> A continuación se explican los conceptos básicos necesarios para poder abordar el tema utilizando técnicas avanzadas de imágenes.

### 1.1 GENERALIDADES

Una emulsión está compuesta de una matriz que recibe el nombre de fase externa o continua. La fase dispersa se conoce como fase discontinua. Por lo tanto, el tipo de emulsión (Figura 1) se da a partir de la forma en la que se encuentren dispuestas estas fases (dispersa y continua). Cuando la fase dispersa es el agua, se denomina emulsión de agua en aceite (W/O) o cuando la fase dispersa es el aceite, se denomina emulsión de aceite en agua (O/W).

---

<sup>1</sup> Vernon Smith, H. & Arnold, K. E., s.f. Crude oil emulsions. En: s.l.:Paragon Engineering Services Inc.

<sup>2</sup> Griffin, W. C. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. New York: Interscience, 2012.

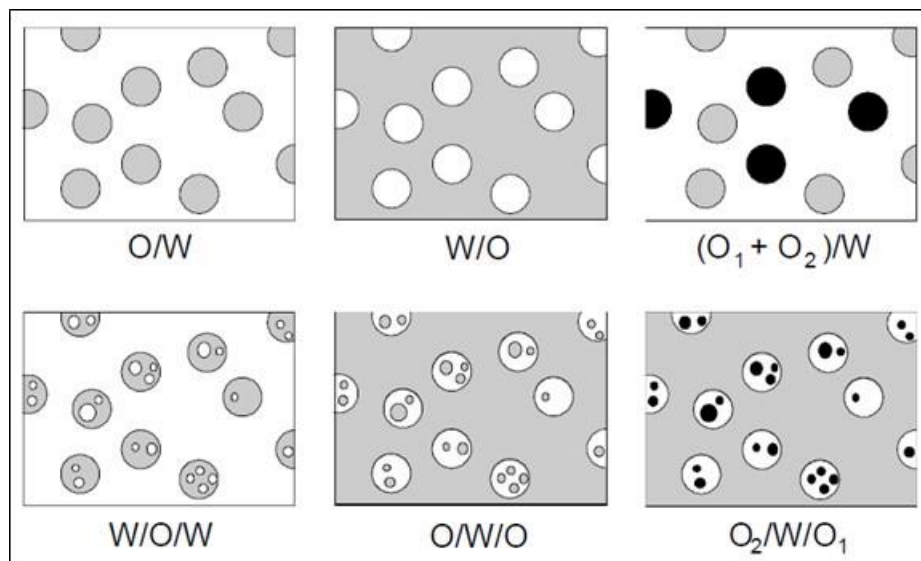
<sup>3</sup> Langevin, D., Poteau, S., Henaut, I. & Argillier, J. F.,. Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation. 2004, 59(511-521).

<sup>4</sup> Sandoval Rodriguez, L. S. Evaluación de la formación de emulsiones agua-en-aceite sobre la viscosidad y las propiedades PVT en crudos pesados, Bucaramanga: s.n., 2014.

Cuando se tiene una emulsión de agua en aceite, existe la posibilidad de formar una emulsión agua-aceite-agua si un pequeño volumen de la emulsión que se tiene al principio es envuelto por una fina capa de agua, dicho de otra manera, el agua se encontrará como fase dispersa y continua, éstas se conocen como emulsiones múltiples (W/O/W, O/W/O u otras).

La morfología en las emulsiones representa una de sus características básicas, quizá la más básica de ellas y usualmente se determina por métodos cualitativos basados en observaciones hechas con ayuda de un microscopio.

**Fig. 1.** Tipos de emulsión



Fuente: Peña, A. A., Dynamic aspects of emulsion stability. S.I.:Houston Rice University, 2004, Pág. 2.

Existe otro tipo de clasificación que se basa en el tamaño de partícula de la fase dispersa. Una emulsión (macro) tiene una distribución de tamaño de partícula entre  $0,05 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$ , mientras una emulsión (micro) se caracteriza por tamaños de partícula entre  $10 - 50 \text{ nm}$ . Entre más pequeño el tamaño de partícula dispersa más estable y difícil de tratar será la emulsión.

También se pueden clasificar según el grado de estabilidad (facilidad para separarse) clasificarse en sueltas, medias y apretadas. Una emulsión suelta se separa en pocos minutos, una emulsión media se separa en un poco más de diez minutos y una emulsión apretada se separa algunas veces solo parcialmente en horas o hasta días.

## **1.2 COMPOSICIÓN DE EMULSIONES**

La composición de las emulsiones depende del tipo, para efecto de este estudio se tratarán las típicamente manejadas líquido – líquido, específicamente agua en aceite. La cantidad que aporte cada fase influye en sus propiedades. Hay emulsiones con fase dispersa en bajo contenido, ya que la interacción entre las gotas es menor; así como también existen emulsiones con alto contenido en la fase dispersa debido a mayor interacción de las gotas, finalmente esto es lo que determina los efectos. Cuando el 75% del volumen es superado por la fase dispersa, las gotas están literalmente en contacto<sup>5</sup> , por esto se eleva la viscosidad. Las concentraciones del rango de 0.2% al 3% son las más frecuentes hoy en día, por cuestiones de costos y eficacia, se utiliza un emulsificante compuesto por mezcla de surfactantes.

## **1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES**

La clasificación de las emulsiones se puede dividir en tres grandes ramas, a continuación, se explican cada una de ellas:

---

<sup>5</sup> Arnold K. & Stewart M. Surface Production Operations, Design of oil handling System and Facilities. Vol. 1. Ed. 3. Gulf Professional Publishing. 2008 25 2.2

**1.3.1 Según la fase continúa de la emulsión** Una manera práctica que facilita la clasificación de emulsiones es dividir las en dos grandes grupos dependiendo de su naturaleza. Los grupos son, primero aceite en agua (O/W, por sus siglas en inglés Oil in Water) y agua en aceite (W/O, Water in Oil), siendo más común esta última. Es decir:

- **Emulsiones Directas:** hace referencia a que la fase continua es aceite y en su fase dispersa hay pequeñas gotas de agua. Que con un 90% se convierte en la más común en los campos petroleros.
- **Emulsiones Inversas:** donde la fase continua es el agua y la fase dispersa son las gotas de aceite.

### **1.3.2 Según el grado de estabilidad**

- **Emulsiones Estables:** son las más difíciles de romper, para facilitar el proceso se deben someter a un tratamiento. Se presentan normalmente en mezclas de crudos asfálticos o con impurezas del aceite y agua de mezcla.
- **Emulsiones Inestables:** Son las mezclas de fluidos que se separan por sí solas en un tiempo pequeño.

### **1.3.3 Según el grado de rompimiento**

- **Emulsiones Apretadas:** requieren de un tratamiento complejo para romper la emulsión.
- **Emulsiones flojas:** tratamientos cortos y sencillos ayudan al rompimiento de estas emulsiones.

## **1.4 FORMACIÓN DE EMULSIONES**

Una emulsión es un sistema termodinámicamente inestable cuando existe una agitación de los líquidos en contacto y cuenta con la presencia de agentes

surfactantes o emulsificantes. Uno de ellos está disperso en el otro en forma de gotas (donde el tamaño generalmente de estas varía de 0.1 a 100 micras)<sup>6</sup>.

El líquido altamente polar representa la fase acuosa, éste tiene naturaleza hidrofílica, el otro líquido representa la fase aceitosa. Las fuentes de agitación son diversas y pueden provenir directamente del flujo de crudo a través de la roca del yacimiento hacia fondo de pozo, por tubería hacia cabeza de pozo, por las líneas de flujo, entre otros<sup>7</sup>. Cabe resaltar que existe un alto grado de movimiento en ocasiones brusco, lo cual no es posible evitar y del cual dependerá la mezcla y por ende el tamaño de la gota que es la que define el tipo de emulsificación; mientras mayor sea el tamaño de gotas menor es el nivel de emulsificación, por lo contrario, entre menor sea el tamaño de las gotas mayor es el nivel de emulsificación, es decir, requiere un tratamiento complejo y es la base de investigación de este estudio.

**1.4.1 Agentes emulsificantes** Primero que todo se debe dejar en claro la diferencia que existe entre agentes emulsionantes y estabilizadores, los primeros facilitan la formación de gotas al reducir la tensión interfacial de los líquidos, mientras que los últimos evitan la coalescencia de gotas. Los agentes emulsificantes dependen de la elección de cada operador, después de analizar las características del crudo y de evaluar las necesidades presentes para la entrega del mismo.

## **1.5 ESTABILIDAD DE EMULSIONES<sup>8</sup>**

La estabilidad emulsiones es la capacidad que tiene un fluido a permanecer disperso en otro. Es de conocimiento general que los crudos con baja gravedad API

---

<sup>6</sup> Kilpatrick P.K. Water-in.crude Oil Emulsion Stabilization: Review and Unanswered Questions. Energy & Fuels, Vol. 26, pp 4017-4026. 2012.

<sup>7</sup> 5 Opawale, Adenkule. Oilfield emulsion control: a major issue during heavy crude oil production. Universidad Africana de Ciencia y Tecnología. Artículo SPE. Abuja (Nigeria), 2009. 27

<sup>8</sup> Sandoval Rodríguez, L. S. Evaluación de la formación de emulsiones agua-en-aceite sobre la viscosidad y las propiedades PVT en crudos pesados, Bucaramanga: s.n., 2014.

tienen a formar emulsiones más que estables que aquellos con gravedad API muy altas, principalmente debido al efecto que causa la viscosidad, la cual dificulta el movimiento de las partículas de agua. Los crudos con presencia de asfáltenos tienden a emulsionarse más rápido que los parafinados.

Para controlar la estabilidad de la emulsión es necesario controlar cinéticamente las partículas debido a que las emulsiones no son estables termodinámicamente. Existen muchas metodologías para alterar la estabilidad de emulsiones como dispersantes mecánicos y/o aditivos químicos. Entre los factores que afectan la estabilidad de una emulsión se encuentran dos muy importantes: la migración del emulgente lipófilo en la emulsión primaria a la fase acuosa externa y la adecuada concentración del emulgente hidrófilo secundario, se puede presentar una inversión de las fases de la emulsión dependiendo de la concentración de emulgente.

La estabilidad de las emulsiones es consecuencia del pequeño tamaño de las gotas y la presencia de películas interfaciales alrededor de las mismas, las cuales experimentan fuerzas de repulsión. La proporción relativa entre la fase dispersa y continua afecta la estabilidad, la cual también se ve afectada por las propiedades del agua y del aceite, la máxima estabilidad se encuentra a bajos porcentajes de agua, cuando las gotas tienen mucha menos oportunidad de unirse a otras gotas y coalescer.

Estudios realizados (Kokal , 2005) han concluido que el PH de la fase acuosa es importante en las emulsiones de hidrocarburo, debido a su efecto sobre la estabilidad ya que una fase acuosa alcalina puede afectar la cantidad y tipo de material agrupado en las películas interfaciales. Mientras que una disminución en el PH de la fase acuosa genera una disminución en las cargas electroestáticas de la superficie de las gotas, de manera que los potenciales repulsivos entre ellas se reducen significativamente.

Es muy importante la determinación de la estabilidad debido a que ayuda a determinar la facilidad de separación. Suele determinarse utilizando el método no

normalizado denominado “prueba de botella”, que consiste en una dilución, aplicando un desemulsificante y agitación; este método es aplicable únicamente a aceites muertos (aceite cuyo gas en solución ha sido totalmente liberado a condiciones atmosféricas). Para el caso de aceites vivos (aceite sometido a una presión mayor que la presión de burbuja, por lo tanto, el gas en solución no ha sido liberado), debido a la necesidad de mantener el fluido a condiciones de alta presión y alta temperatura para conservar sus propiedades, la única técnica que puede emplearse es la cuantificación del tiempo en el cual el agua se separa por efecto gravitacional.

La medida de la elasticidad y viscosidad de las películas interfaciales que se forman sobre las superficies líquidas (reología interfacial) tiene un papel importante en la estabilidad de las emulsiones W/O puesto que provee información sobre la compresibilidad y estabilidad de dichas capas. (Sloblom , 2006).

**1.5.1 Factores que afectan la estabilidad** Entre los factores que afectan la estabilidad están todos aquellos vinculados a las alteraciones infringidas. Algunos de estos son:

- **El tipo de aceite:** Según algunas fuentes, los crudos que poseen una base parafínica no forman emulsiones muy estables, pero si su base es mixta o nafténica, la emulsión tiende a ser más estable si contiene ceras, asfaltenos, resinas y sólidos finos.
- **La presencia de compuestos de alto peso molecular:** Los compuestos de alto peso molecular presentes en la emulsión tienden a formar películas alrededor de las gotas dispersas, aumentando la estabilidad de la emulsión. Es cuando ese tipo de casos se presentan que aparecen las denominadas micelas, compuestas por material polar, ésta tiene una parte polar que tiene afinidad por el agua y una no polar que tiene afinidad por el crudo y cubre las gotas dispersas.
- **La temperatura:** Es un factor de mucha influencia ya que afecta directamente algunas propiedades del fluido; cuando la temperatura aumenta se incrementa la

energía interna de las gotas, por lo tanto hay un mayor choque entre ellas y se ve reflejado en la disminución de la tensión interfacial y aumento de la coalescencia. En general el incremento de la temperatura es de gran ayuda para disminuir la viscosidad de la emulsión, sin embargo, a veces no suele tener el mismo efecto pues existen unas interfases con películas rígidas que permanecen a pesar del incremento de la temperatura si no existe alguna alteración con sustancias a su polaridad o rigidez.

- **El tamaño de las gotas:** Influye mucho en la estabilidad de la emulsión debido a que entre más pequeñas las gotas más estables se hace la emulsión, (se debe recordar que mientras mayor sea la estabilidad de la emulsión más difícil es su tratamiento), por el incremento del área de contacto entre fases, lo que se busca es obtener tamaños de gota más grandes para que su estabilidad sea menor.

## 1.6 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA<sup>9</sup>

Las partículas de la emulsión siempre presentan una poli-dispersión finita en su tamaño. La distribución del tamaño de partícula corresponde a una distribución estadística existente de la disgregación de la fase dispersa. Esta información es de gran importancia debido a que el tamaño de las partículas afecta otras propiedades de la emulsión tal como la estabilidad y reología.

Varios métodos han sido usados para la determinación del tamaño de partículas en emulsiones, incluyendo microscopia, microfotografía, videomicroscopía, rayos X, resonancia magnética nuclear (RMN), entre otros.

---

<sup>9</sup> Peña, A. A. Dynamic aspects of emulsion stability. S.I.:Houston Rice University.2004

## 2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En particular los diseños experimentales buscan establecer relaciones de causa y efecto; básicamente hacen referencia a que a una variable independiente (causa) se le asocie una variable dependiente (efecto). Los valores estadísticos son fundamentales en la investigación ya que son los que dan validación o confirmación al procedimiento empleado; aquí se prescriben una serie de pautas que se van a utilizar, qué tipo de variables, de qué manera y cuántas veces se va a repetir el experimento, el objetivo de la experimentación es obtener información de calidad para poder llevar a cabo una mejor interpretación de datos, con un margen de error menor, se va utilizar un experimento  $3^k$ <sup>10</sup> que proporciona el número de ensayos total a 18 con los cuales se generarán conclusiones validas sobre un rango de condiciones experimentales.

### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas que se presentan en superficie para el transporte del crudo, se evidencian de diferentes formas y están asociados ya sea a las características del crudo o a factores externos a este, uno de ellos está relacionado a las emulsiones. La estabilidad de emulsiones es una de las complicaciones que se presentan para el desplazamiento de crudo por tuberías, porque una alta estabilidad crea dificultades posteriores en las operaciones de separación del agua, por eso se ve la necesidad de realizar estudios a profundidad sobre el comportamiento de emulsiones agua-aceite y evaluar los efectos del tamaño de gota en estas para optimizar los procesos de producción en el tren de tratamiento de facilidades y transporte de crudo de un pozo.

---

<sup>10</sup> Gutiérrez H. & De la vara R. Análisis y diseños de experimentos. Mc Graw Hill, segunda edición.

## 2.2 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

La experimentación forma parte natural de la mayoría de investigaciones, en muchas de las cuales, los resultados se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad del resultado muestral, es necesario conocer estos factores y la medida en la que están afectando los resultados, para esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan estas unidades experimentales, pero para obtener resultados acertados es necesario tener en cuenta que las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, para que sean más eficaces y proporcionen mejores resultados a un menor costo.

**2.2.1 Identificación de las variables** La variable directamente a medir es el tamaño de gota de agua de la fase dispersa, se tendrá en cuenta los resultados después de haber aplicado diferentes velocidades de agitación (rpm) y distintas concentraciones de químico a la emulsión tratada para posteriormente mirar el efecto de estos tamaños en la reología de la muestra de crudo que se trabajó. Para el desarrollo de la prueba experimental, se realizó un diseño factorial  $3^k$  que consiste en 2 repeticiones para cada muestra de emulsión (9), para un total de 18 pruebas, divididas en 3 etapas consecutivas: pruebas al fluido para determinar el %SW y los °API), posteriormente se realizó la prueba de emulsiones que consisten en aplicar químico (en diferentes concentraciones), agitar modificando las rpm, introducir en baño de temperatura por 3 periodos con intervalo de 30 minutos cada uno y hacer la respectiva toma de datos para finalmente realizar la toma de fotografía por medio del microscopio óptico de luz transmitida.

Se tienen dos líneas bases y la prueba  $3^k$

- 1) Línea Base con RPM=0 y [químico]=0
- 2) Línea Base con RPM=0 y [químico]=Separador

**Tabla 1.** Diseño experimental de las pruebas en laboratorio

Concentración RPM	[0] o <	[separador]	> [separador]
50	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)
500	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)
1000	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)	1 prueba (1 repetición)

[0]: Sin rompedor de emulsión

[Separador]: Concentración 800 ppm rompedor

[>Separador]: Concentración 1600 ppm rompedor

Luego se harán las respectivas comparaciones entre líneas bases y las pruebas de la tabla 1 para presentar las conclusiones finales a la investigación.

**2.2.2 Recursos y materiales disponibles** Para realizar un experimento se deben definir los objetivos del experimento identificar las posibles fuentes de variación, es por eso que la identificación de recursos y materiales de los cuales se dispone juega un papel importante ya que define el alcance de las variaciones y el tipo de pruebas que se pueden realizar.

- **Microscopio Axio Imager Z1m**

El Axio Imager Z1m (ver figura 2) es un microscopio completamente motorizado. El sistema funciona con un mecanismo de rápido enfoque a microscopía fluorescente. Está equipado con una sensitiva cámara monocromática (Zeiss, AxioCam MRm) y tiene filtros para UV (Dapi, Hoechst).

**Fig. 2** Microscopio Axio Imager Z1m



- **Fuente de luz externa**

Este dispositivo (ver figura 3) usa una luz para iluminar todo tipo de objetos en ciencia industrial. Es una atractiva alternativa al halógeno convencional. Es un diseño inteligente que puede ser montado en cualquier microscopio estándar. La iluminación es equivalente a 30-watt.

**Fig. 3** Fuente de luz externa



- **Hidrómetro**

Es un instrumento sencillo, normalmente de vidrio y con una forma cilíndrica. Al introducirse en un líquido, el hidrómetro permanece sumergido de manera parcial y a través de una escala que se indica en el vidrio es posible calcular la densidad del líquido analizado. Esta sería una versión sencilla, pero hay hidrómetros mucho más sofisticados, por ejemplo, los de tipo digital, como se observa en la figura 4.

**Fig. 4** Hidrómetro



Al momento de desarrollar la prueba de determinación de la densidad, es importante tomar la temperatura de la muestra porque la densidad depende de ésta, entre más caliente un líquido menos denso es.

- **Muestras**

Cada una de estas muestras contenía 100 ml de crudo con el que se trabajó en este proyecto, se utilizaron 3 muestras, como se evidencia en la figura 5.

**Fig. 5** Muestras



- **Viscosímetro Saybolt**

Este equipo consiste en un recipiente destinado a contener el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y donde en su parte inferior dispone un orificio de diámetro normalizado, se puede ver en la figura 6.

**Fig. 6** Viscosímetro Saybolt



- **Viscosímetro Ofite Model 900**

Este instrumento (ver figura 7), empleado para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo de un fluido. En este caso lo utilizamos para medir la viscosidad para cada una de las muestras, la cual posteriormente fue corregida.

Este viscosímetro en su versión automática que se encuentra disponible en el laboratorio de Guatiguará, facilita la lectura en pantalla y más preciso.

**Fig. 7** Viscosímetro Ofite Model 900



- **Baño de temperatura**

Este equipo fue utilizado a temperatura de 120 °F para elevar la temperatura de cada una de las muestras, manteniendo un registro continuo del comportamiento de las mismas, se puede observar en la figura 8.

**Fig. 8** Baño de temperatura



### **2.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS**

Para poder llevar a cabo la evaluación del comportamiento de las emulsiones, objeto de este trabajo de investigación, es necesario realizar un experimento a escala microscópica de algo que en la realidad ocurre a grandes dimensiones en el campo petrolero. El fluido base para el desarrollo de esta investigación es el producido por los pozos del campo Casabe, operado por Ecopetrol S.A. La primera medida consiste en seleccionar la muestra a tratar, ésta es tomada a la salida del separador de la estación N° 5 del campo, como referencia a la línea base, por ser una muestra representativa y manejable; por otro lado se obtuvo otra muestra del cabezal del pozo CBE 1045, Este procedimiento se hizo de la siguiente manera:

- Se procede a recolectar las muestras de campo: directamente de la salida del separador en la estación N° 5 y de cabeza de pozo en CBE 1045, se hace

el traslado desde Yondó, Antioquía hasta el laboratorio de Guatiguará, Piedecuesta.

- Se trabaja en el laboratorio de fluidos de la sede UIS Guatiguará, dividida en dos secciones: en primera instancia se miden los parámetros del crudo (viscosidad Saybolt, %SW, °API). Luego se realiza las pruebas de botella: se vierten 50 ml de emulsión en cada botella (18 en total) nos regimos por la tabla 1 donde 6 botellas van con crudo sin ningún tipo de químico, otras 6 van con el químico inyectado directamente en campo y las restantes se les aplica 6 gotas de químico por cada botella (químico suministrado por el campo el cual usan como rompedor de emulsiones), esta última prueba como se indicó en la tabla 1 se hace con el fin de revisar que pasa al aumentar la concentración de rompedor, en campo utilizan una concentración de 800 ppm, por este motivo al hacer conversión equivalente y se decide aplicar esta cantidad de gotas; posteriormente se aplica agitación manual durante 30 segundos para luego introducirse en baño de temperatura (120°F) cronometrados cada 30 minutos para después ser trasladadas al viscosímetro OFITE donde se les aplicaba las revoluciones estipuladas en la tabla 1 a 50, 500 y 1000 rpm.
- Inmediato a esto se procede a llevar la muestra al laboratorio de microscopia
  - a. Se hace uso del microscopio Imager Z1m de luz transmitida y con ayuda de una fuente externa KL 300 Led se coloca la primera muestra y se inicia la calibración del equipo. Se procede muestra por muestra para la toma de imágenes, las cuales se puede observar directamente en la pantalla que pertenece al equipo.
  - b. Haciendo uso del programa Axiovision se realiza la captura de imágenes, las cuales van a ser analizadas posteriormente.

### 3. TÉCNICAS AVANZADAS DE IMÁGENES Y ESTADÍSTICA

Producto de una revisión bibliográfica extensa, los análisis utilizados a nivel mundial con mejores resultados empleando técnicas avanzadas de imágenes pueden ser clasificados como métodos “globales” que determinan una propiedad promedio del sistema, tal como su superficie o su reflectancia y por lo tanto solo dan un diámetro equivalente. Por otro lado, están los métodos “individuales” que consideran las propiedades a escala de gota y que mediante análisis estadísticos, llevan a la distribución de tamaños.

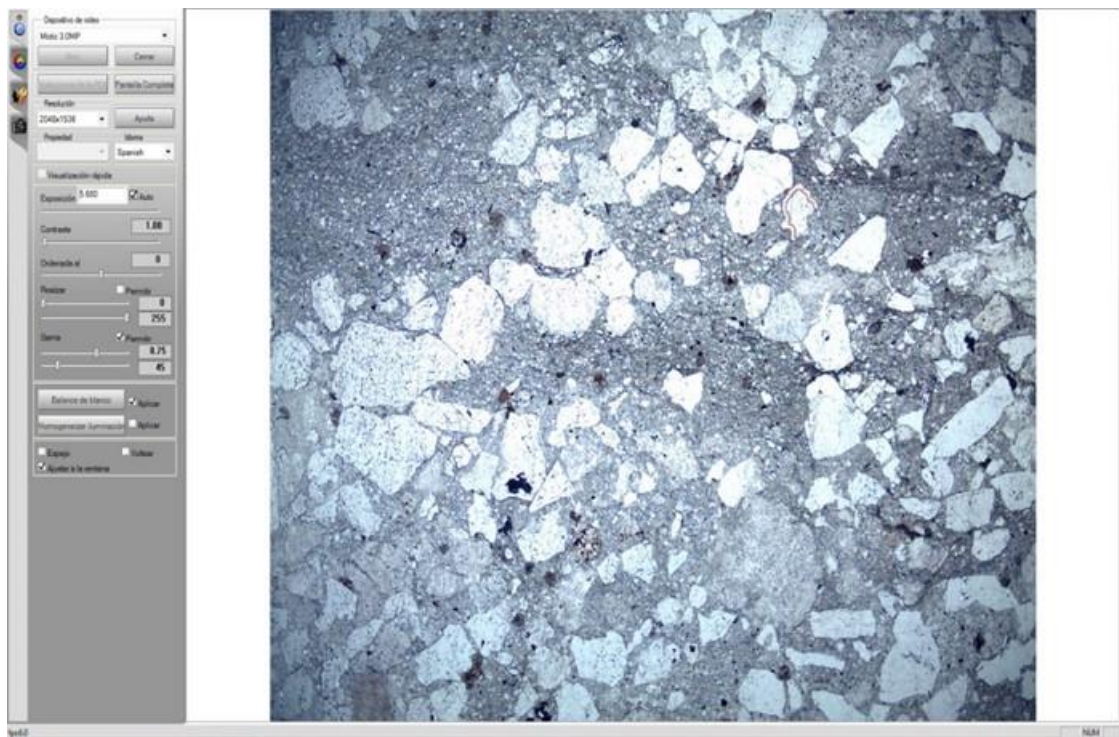
El objetivo de usar técnicas avanzadas de imágenes radica en caracterizar la distribución de tamaños de gota en las emulsiones dimensionando el grado de dispersión de los fluidos usando parámetros como el tamaño de gota medio (Polat, et al., 1999), el diámetro de Sauter (Sajjadi, et al., 2002), y el diámetro de tamaño de gota más estable (Ruiz, et al., 2002). Analizar solo estos parámetros no es la manera más adecuada para caracterizar emulsiones ya que podrían fallar al no proporcionar toda la información del sistema. Por ejemplo, es posible encontrar dos emulsiones que teniendo el mismo diámetro de gota medio, exhiben un comportamiento diferente a causa de desigualdad en la distribución del tamaño de las estas gotas. Por tanto, una determinación precisa de la mayoría de los parámetros característicos de una emulsión será dada por la distribución de los tamaños de gota de la misma. Si los parámetros de la función distribución pueden ser relacionados con el proceso de emulsificación o con las propiedades de la emulsión resultante se obtendrá información más útil.

El impacto en la industria está direccionado a mejorar el diseño de sistemas de flotación, extracción de solventes, tratamiento de aguas de producción, mejoramiento de sistemas de separación agua-aceite e incluso fluidos de perforación.

### 3.1 OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Motic es módulo de imágenes en vivo de captura de imagen profesional que se utiliza para mejorar, modificar o cambiar la calidad de imagen antes de capturar la imagen final. Proporciona un potente ajuste de vídeo, transmisión de imágenes en directo y funciones de captación de imágenes, permitiendo a los usuarios ver y ajustar la imagen en tiempo real, capturar una imagen fija en el directorio asignado o directamente transferir una imagen en tiempo real en el software principal para su posterior procesamiento o análisis. En la figura 9 se puede apreciar que al abrir el programa, aparece el siguiente interfaz:

**Fig. 9** Panel de visualización software toma de imágenes



Se puede encontrar 4 menús que se mencionan a continuación:

**Fig. 10** Submenú módulo de imágenes en vivo



De la figura 10 se despliegan las siguientes opciones:

1. Selecciona la resolución a la cual se desea tomar la imagen

2. Si se desea que el manejo del brillo y la luz se haga de manera automática, se selecciona la casilla auto de lo contrario ajuste manualmente con la barra que se encuentran en esta sección.

**Fig. 11** Submenú corrección de color módulo de imágenes en vivo



3. En esta sección se ajustan manualmente según el usuario los colores y su atenuación en los tres canales ROJO, VERDE, AZUL como se aprecia en la figura 11.

**Fig. 12** Submenú de calibración de imágenes, módulo de imágenes en vivo



4. En la figura 12 se aprecian los ajustes avanzados donde se encuentra la posibilidad de aumento en detección de bordes, filtros para eliminar el ruido, calibración y colocar regla como muestra.

**Fig. 13** Submenú toma de imágenes, módulo de imágenes en vivo

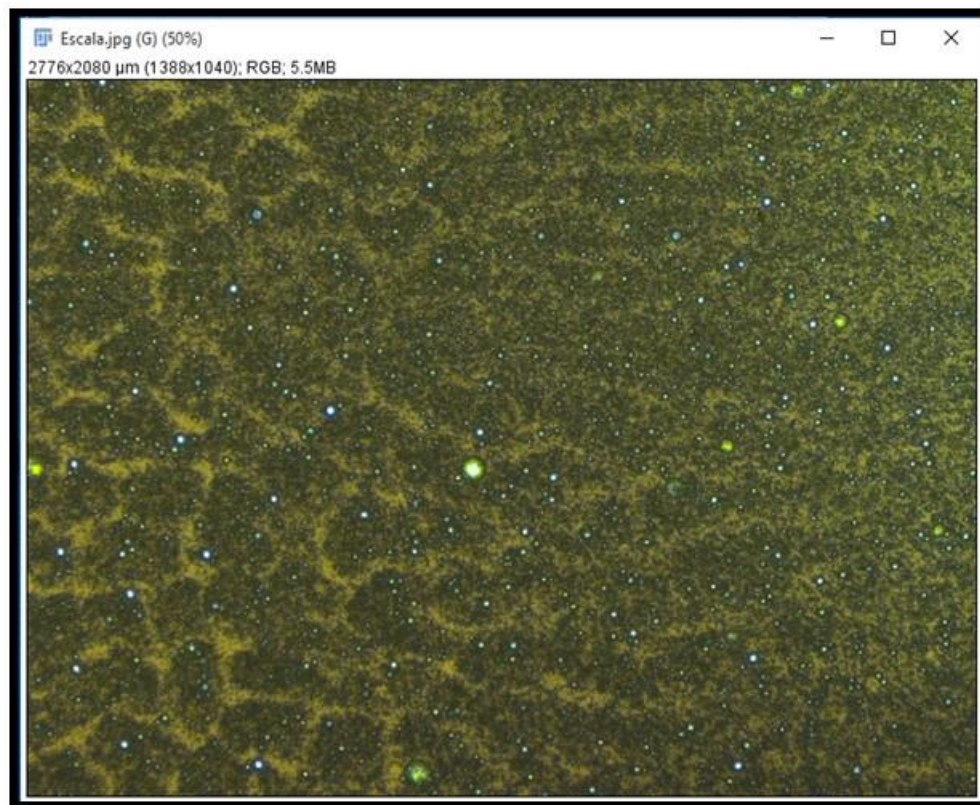


5. En la figura 13 está la sección que toma la captura; si se desea una foto o se graba, si se quiere obtener video de algún procedimiento.

### 3.2 METODOLOGÍA PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Se utilizó el tratamiento avanzado de imágenes con ayuda del software imageJ- Fiji para poder procesar y analizar los resultados obtenidos de la microscopía óptica. La escala que se obtuvo fue de 0.5  $\mu\text{m}$ / pixel en un objetivo de 5x.

**Fig. 14** Imagen emulsión w/o con escala en imageJ-Fiji

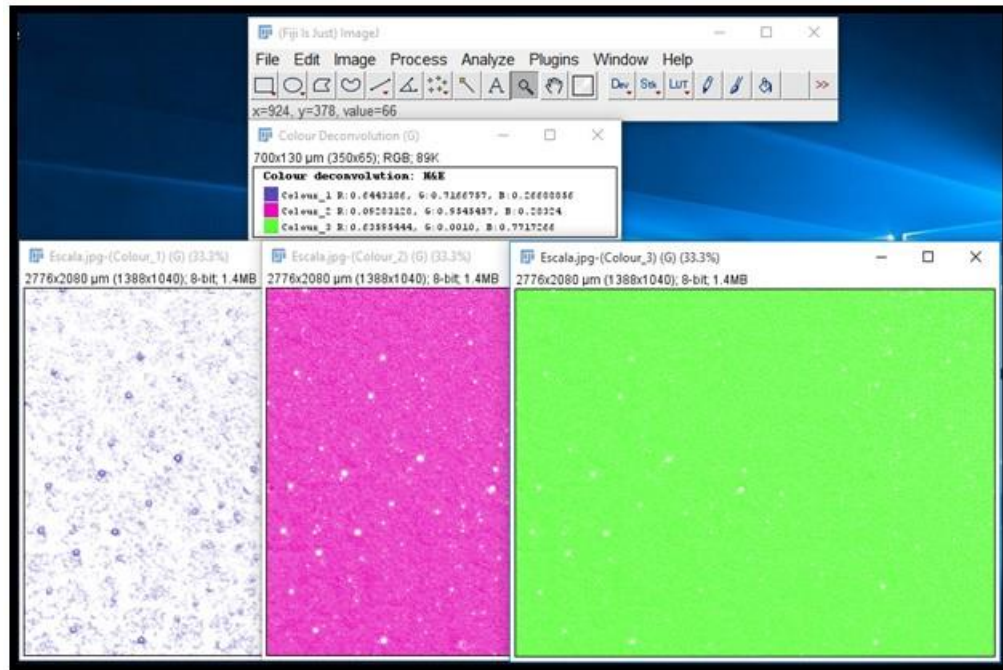


El primer paso consiste en aplicar técnicas de suavizado y fijación de colores a cada imagen obtenida del programa del microscopio, para tal fin se utiliza los filtros Smooth y Sharpen que están establecidos por defecto del software.

Luego se aplica una técnica de procesamiento llamada “Colour deconvolution” que consiste en separar en los tres canales en los cuales se encuentran las imágenes de tipo RGB (Rojo, Verde y Azul), para este caso se escogió el vector H&E debido a que el objetivo que se desea posee un tono muy cercano al blanco.

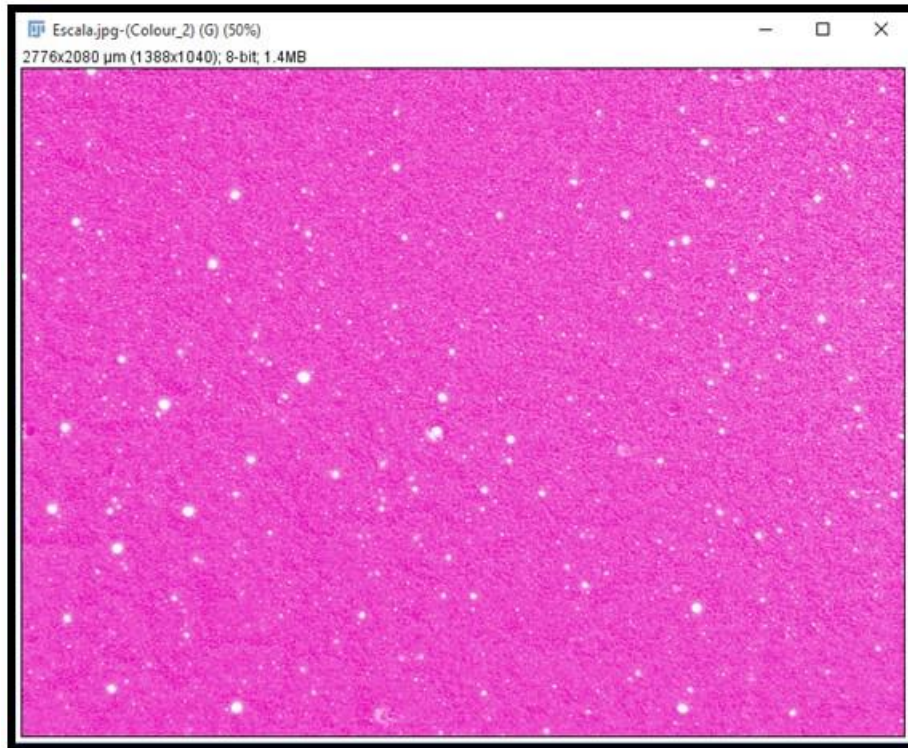
Al realizar este proceso el software proporciona 3 imágenes (figura 15), las cuales corresponden a un respectivo canal de procesamiento.

**Fig. 15** Resultado del proceso de Colour deconvolution



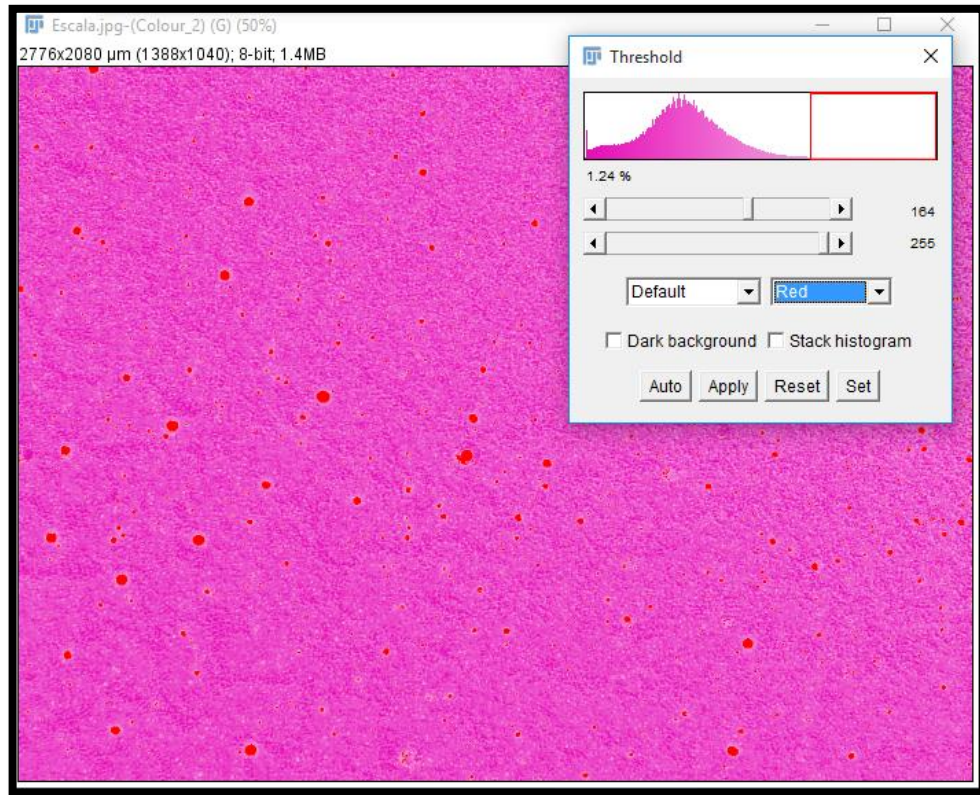
Teniendo estos tres canales de imágenes, cada una de ellas pasa a ser de carácter 8 bits, esto quiere decir que sus tonos van desde 0 a 255, para cada caso, siendo 255 el tono más cercano al objetivo opuesto que se desea, en este caso para una mejor calidad del objetivo principal, se escogió el canal Rojo.

**Fig. 16** Imagen 8 bit en tonalidades rojas



En la figura 16 podemos apreciar que los puntos blancos, representan cada gota de la fase dispersa en la emulsión, para determinar su tamaño se aplica threshold, en el histograma de la imagen seleccionando los valores más cercanos a 255 los cuales no hagan parte de la campana, esto asegura que solo los tonos más blancos serán seleccionados.

**Fig. 17** Imagen aplicando threshold



Luego de seleccionar los valores en el histograma (ver figura 17), se procede a seleccionarlos de tal forma que el siguiente paso a realizar sea convertir la imagen a una imagen binaria y con esto determinar sus propiedades gracias a la facilidad del software para analizar partículas en imágenes binarias de forma automática

Se procede a realizar la operación de análisis de partículas que ofrece el programa por defecto, después de la obtención de los valores de cada una de las gotas previamente seleccionadas, el software ofrece dos clases de resultados: un resumen donde muestra las generalidades de su procesamiento y otro más detallado que será utilizado en este caso particular.

Fig. 18 Imagen binaria

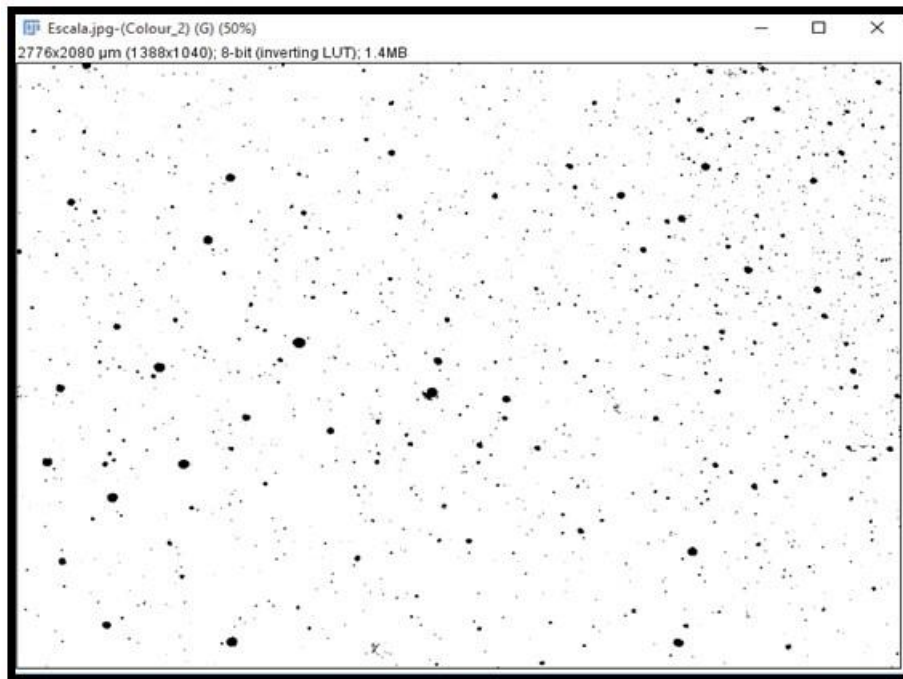


Fig. 19 Imagen binaria aplicando analyze particles

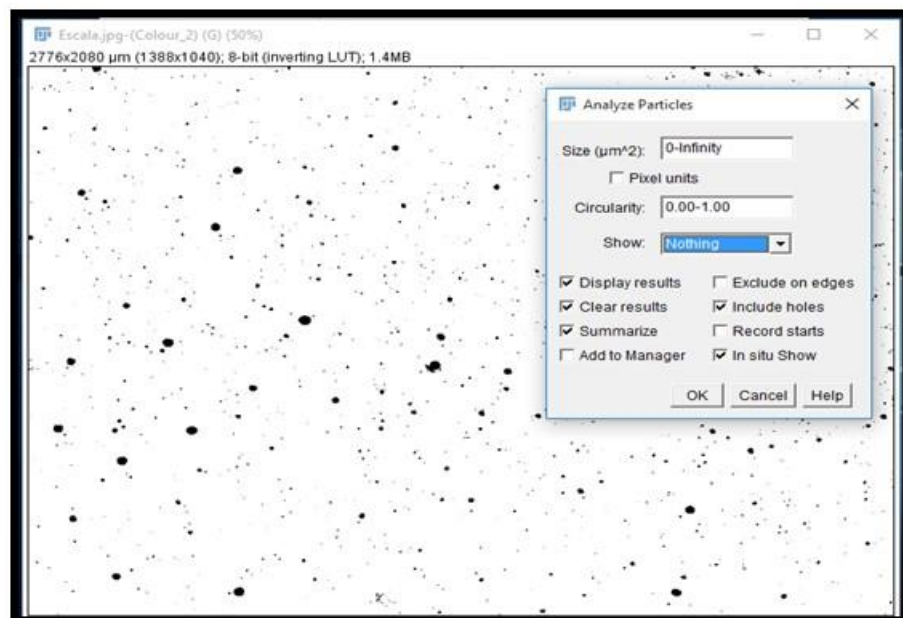
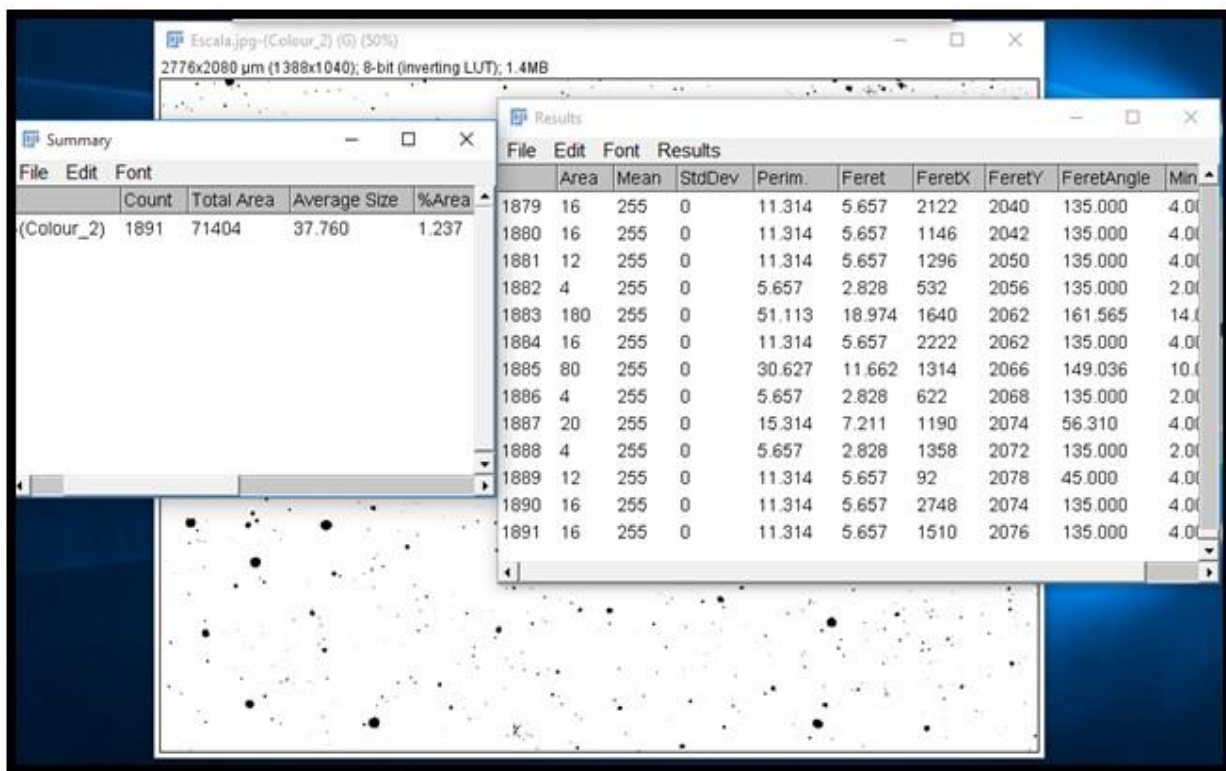


Fig. 20 Resultados del analyze partícles



Luego según la figura 20 se procede a guardar en un archivo .xls cada resultado obtenido para su posterior tratamiento con un programa estadístico, por simplicidad en el proceso se utilizó Microsoft Excel para tal proceso.

### **3.3 ESTADÍSTICA APLICADA**

Se denomina estadística aplicada al área de la estadística que se ocupa de inferir resultados sobre una población a partir de una o varias muestras. Es la parte de la estadística que se aplica en cualquier otra rama externa a ella, como psicología, medicina, sociología, historia, biología, mercadotecnia, etc. En este trabajo solo se hizo uso de algunos de los parámetros de la estadística, los que después de una revisión, fueron seleccionados como los más importantes para este análisis.

**3.3.1 Media aritmética** En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, en este caso, se obtuvieron valores para cada una de las nueve.

**3.3.2 Desviación estándar** La desviación típica o desviación estándar (denotada con el símbolo  $\sigma$  o  $s$ , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

**3.3.3 Distribución normal** En estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### LINEA BASE

Se trabajó con una muestra de salida de separador en la estación N° 5 del campo Casabe junto con otra que fue obtenida del pozo CBE 1045 a la cual se le adicionó una concentración de rompedor para poder cumplir con las condiciones de operación de prueba descritas en la tabla 2, luego se realizó la caracterización de éstas, los resultados se pueden observar en la tabla 3.

Para el análisis de los resultados se planteó un modelo de experimentos el cual consiste en 3 escenarios diferentes con 3 concentraciones del rompedor de emulsiones para un crudo de gravedad API 19°, lo cual se resume en la tabla 2:

**Tabla 2.** Especificaciones de escenario y concentración.

Escenario	Concentración
50 rpm	Sin rompedor
500 rpm	Concentración a nivel de separador
1000 rpm	Concentración mayor al nivel de separador

**Tabla 3.** Caracterización crudo líneas base.

Muestra	°API	Viscosidad	%SW	%Agua
Cabeza de Pozo CBE 1045 Campo Casabe	19	102cP	0,2	25
			1	30
Separador General – Estación N° 5 Casabe	19,3	98cP	2	12
			2	16

#### 4.1 EMULSIÓN 50 RPM SIN ROMPEDOR

Fig. 21 Emulsión 50 rpm sin rompedor

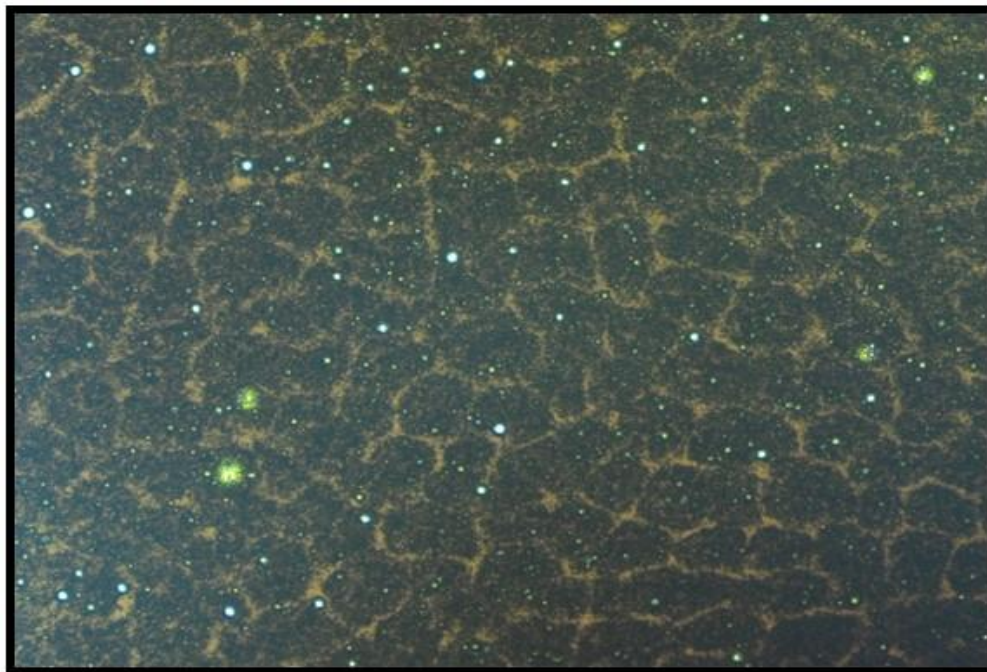
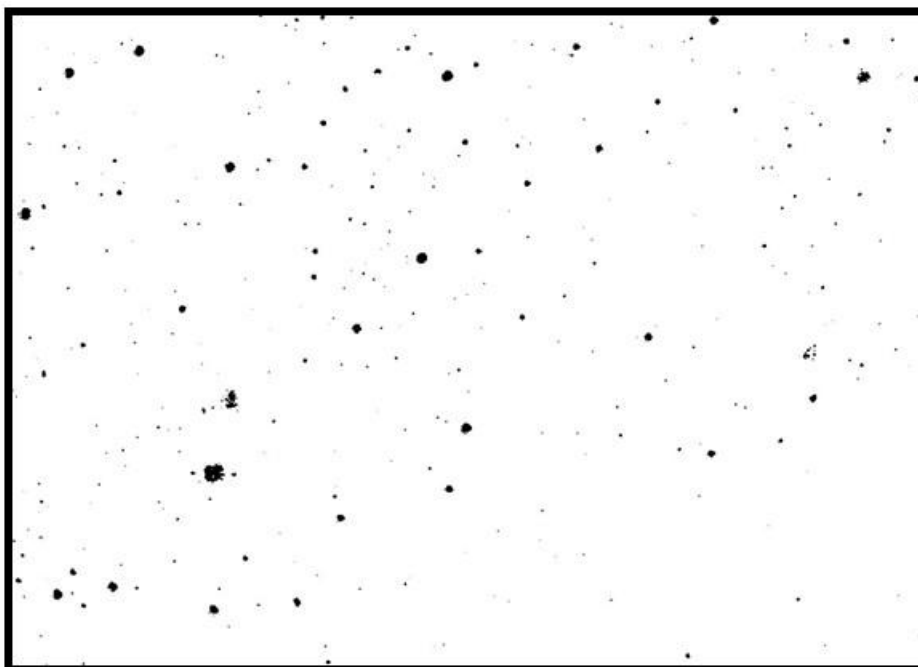
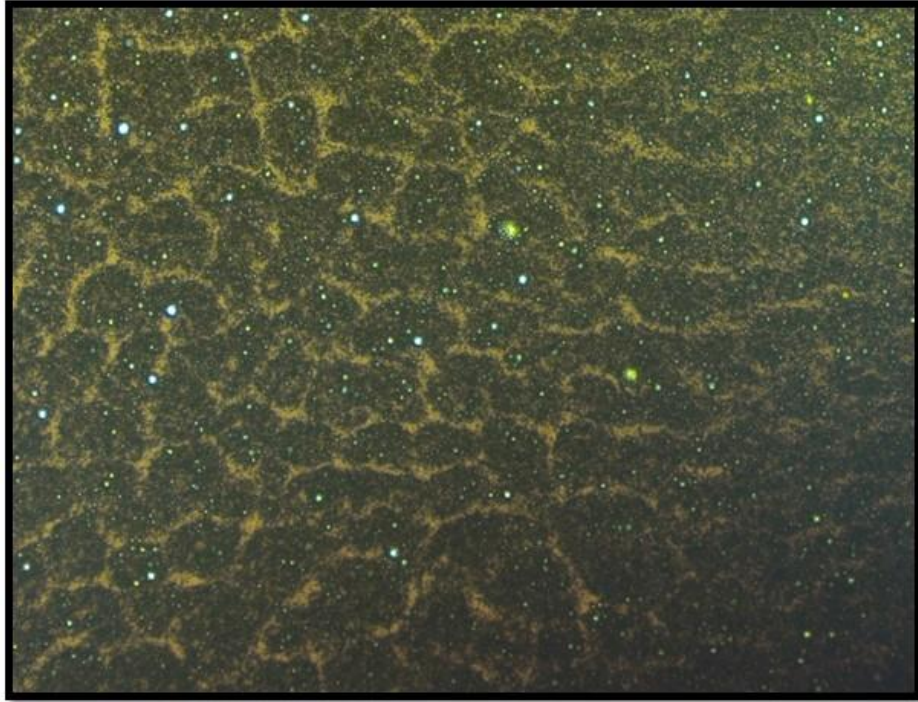


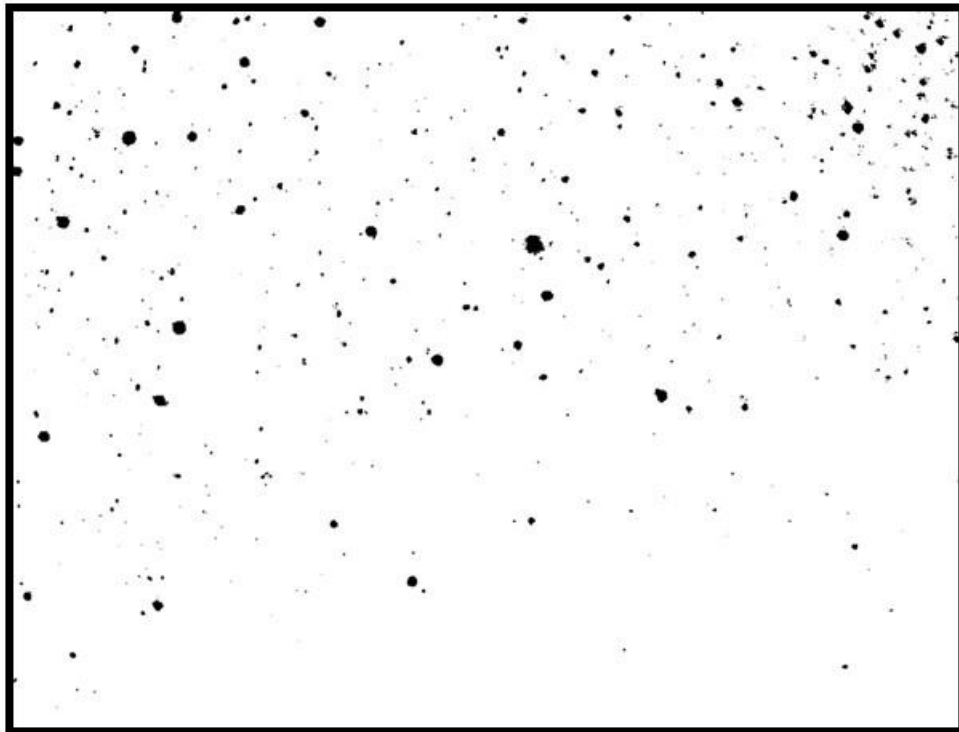
Fig. 22 Imagen binaria Emulsión 50 rpm sin rompedor



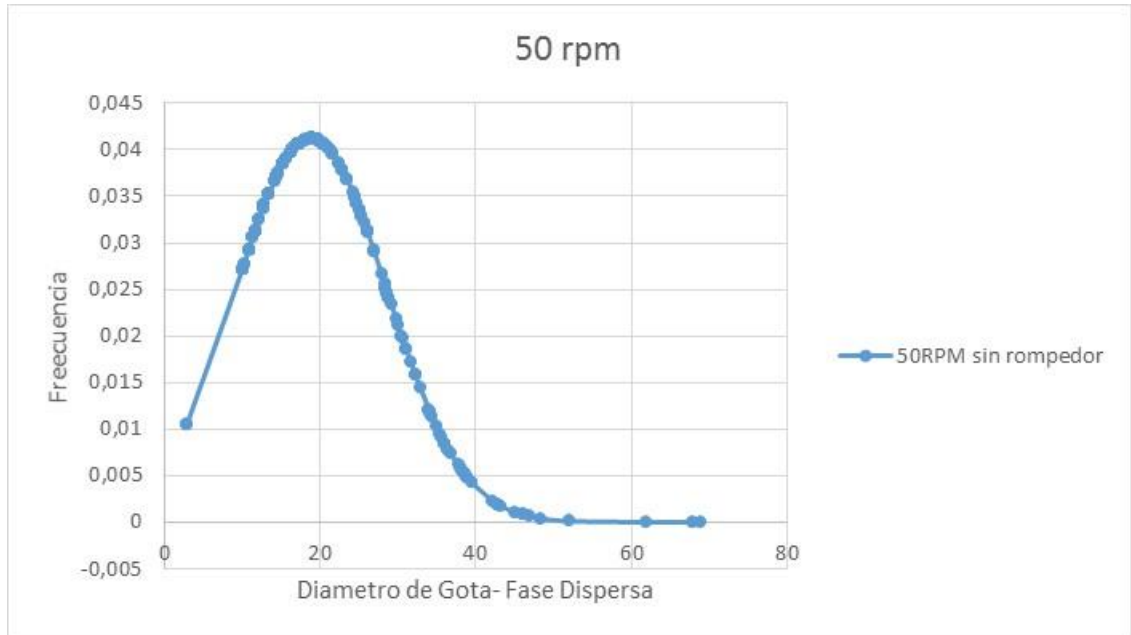
**Fig. 23** Emulsión 50 rpm sin rompedor



**Fig. 24** Imagen binaria Emulsión 50 rpm sin rompedor



**Gráfica 1.** Distribución normal 50 rpm sin rompedor



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 18.814 \mu\text{m}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 68.964 \mu\text{m}$

Mediana:  $16.125 \mu\text{m}$

Desviación estándar:  $9,683$

## 4.2 EMULSIÓN 50 RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR

Fig. 25 Emulsión 50 rpm concentración separador

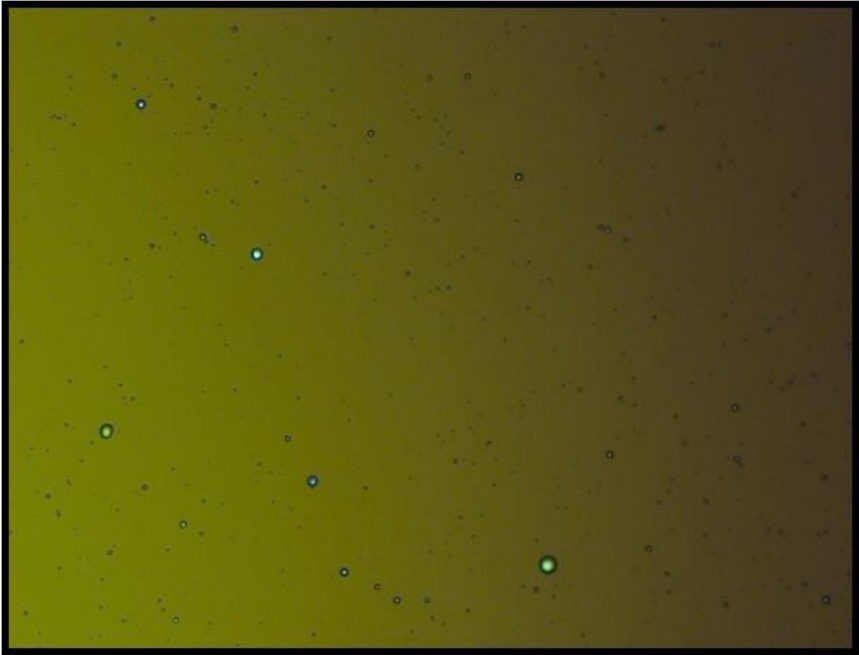
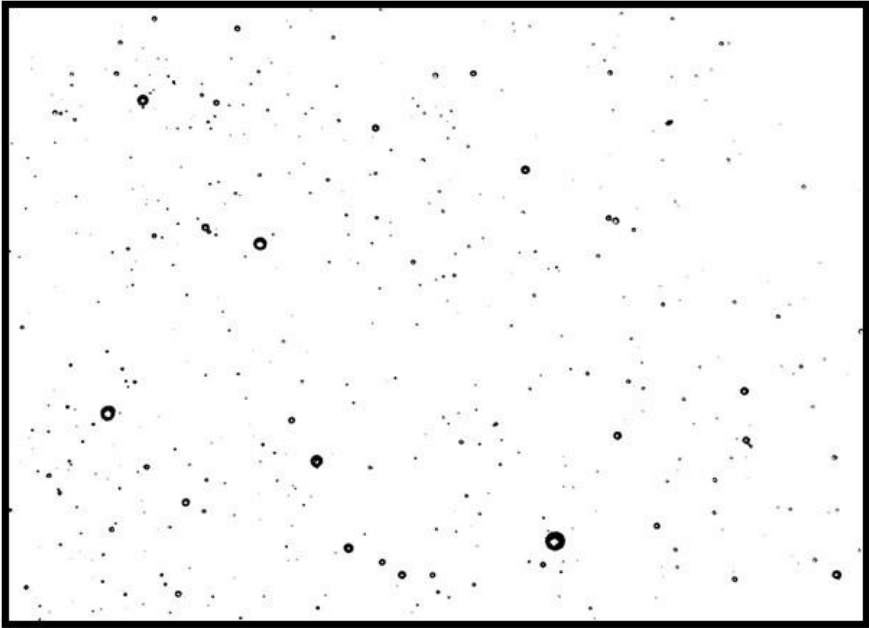
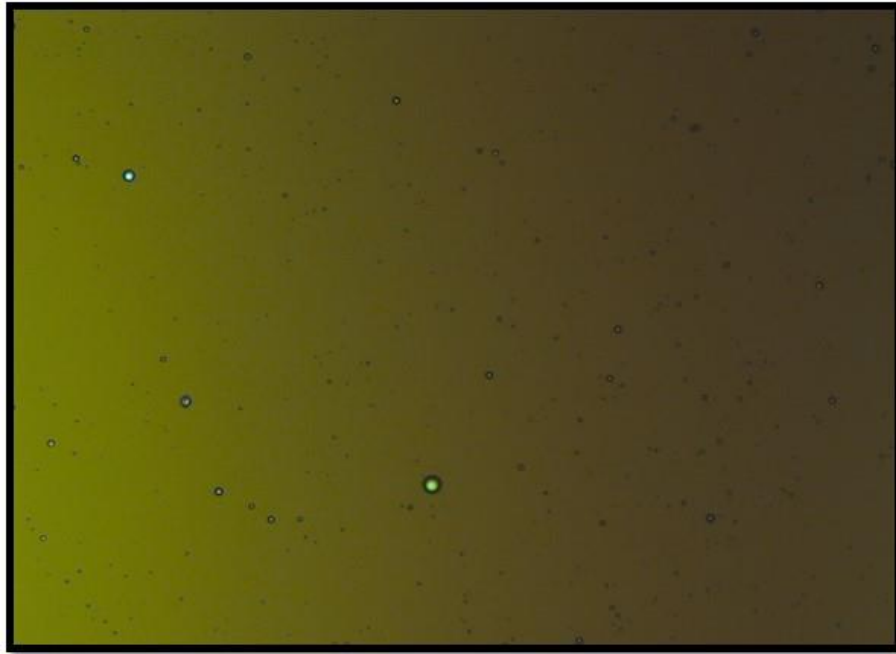


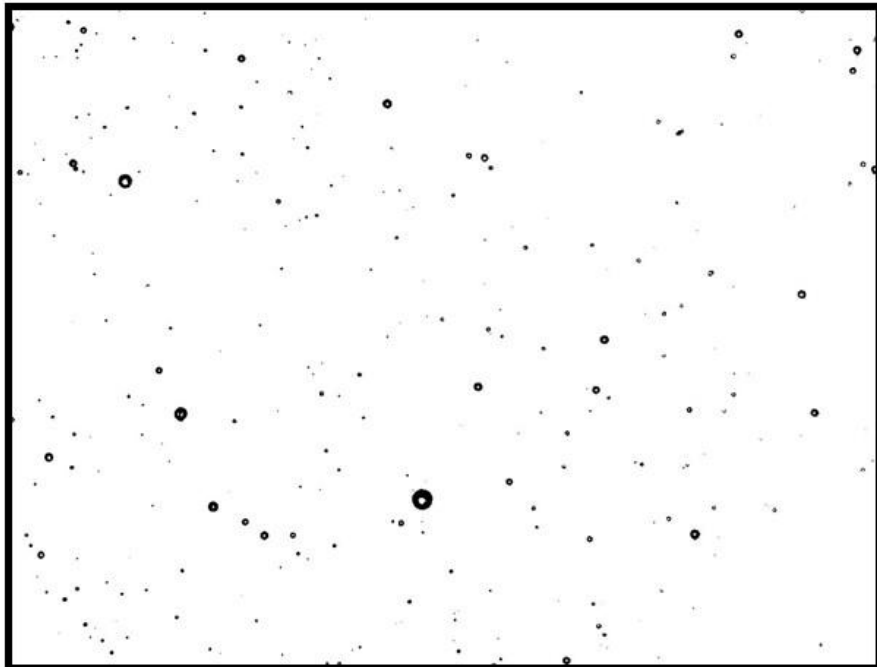
Fig. 26 Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración separador



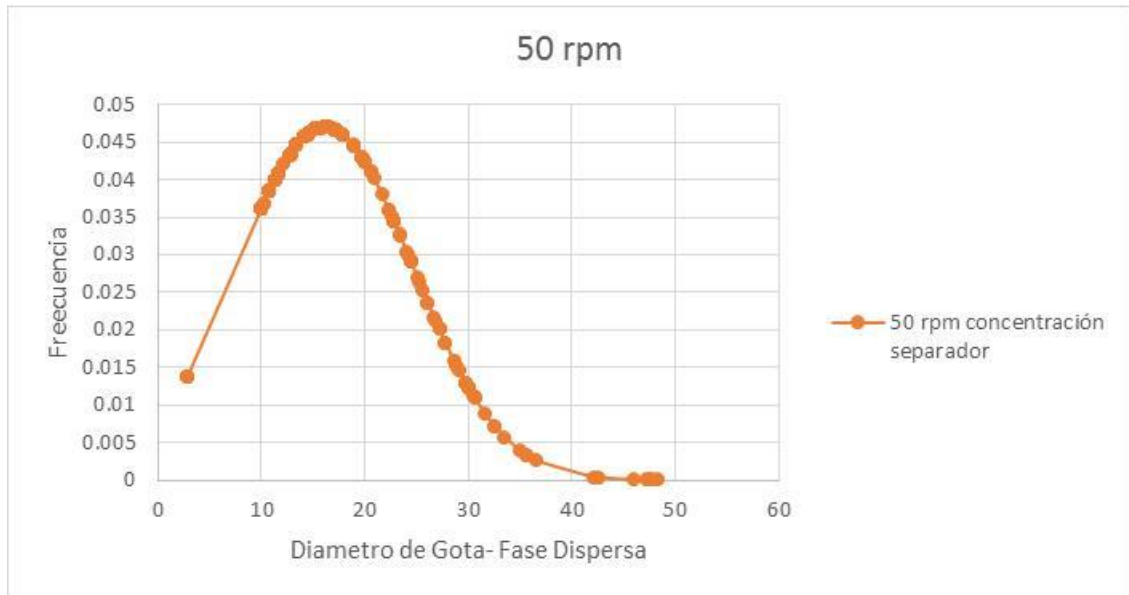
**Fig. 27** Emulsión 50 rpm concentración separador



**Fig.28** Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración separador



**Gráfica 2.** Distribución normal 50 rpm concentración separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 16.1477795 \mu\text{m}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 69.08 \mu\text{m}$

Mediana:  $13.416 \mu\text{m}$

Desviación estándar:  $8.48063$

### 4.3 EMULSIÓN 50 RPM CONCENTRACIÓN MAYOR DE SEPARADOR

Fig. 29 Emulsión 50 rpm concentración mayor de separador

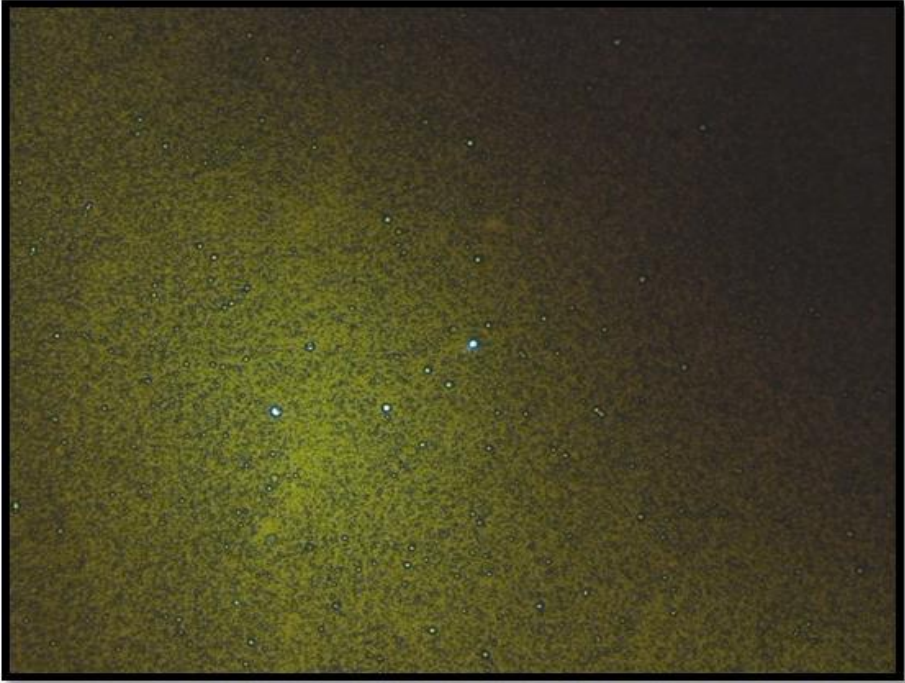
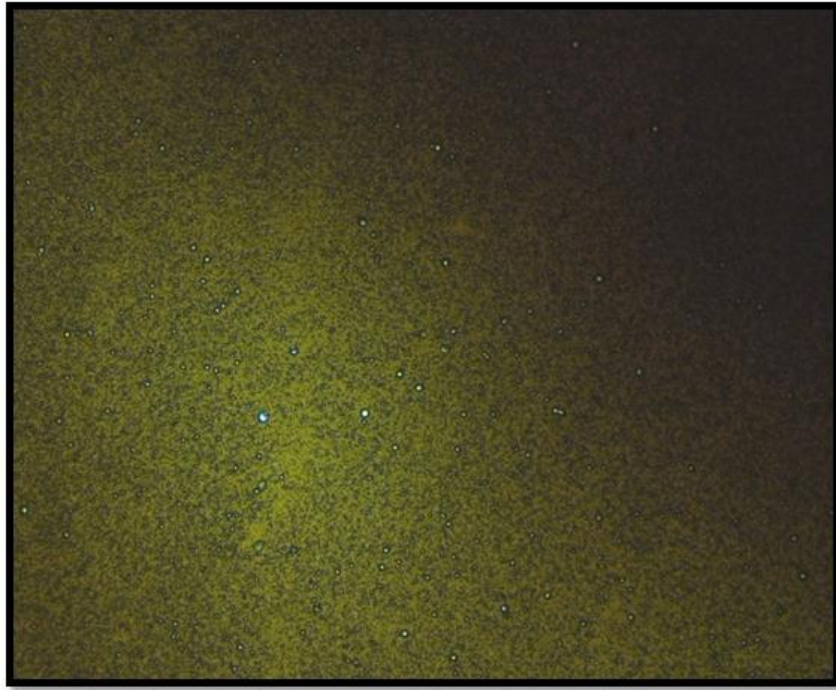


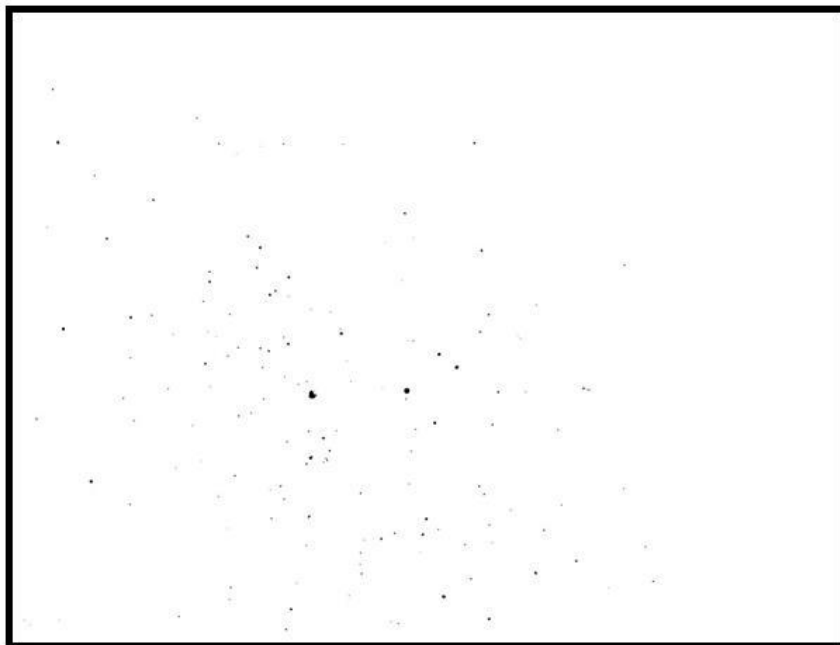
Fig. 30 Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración mayor de separador



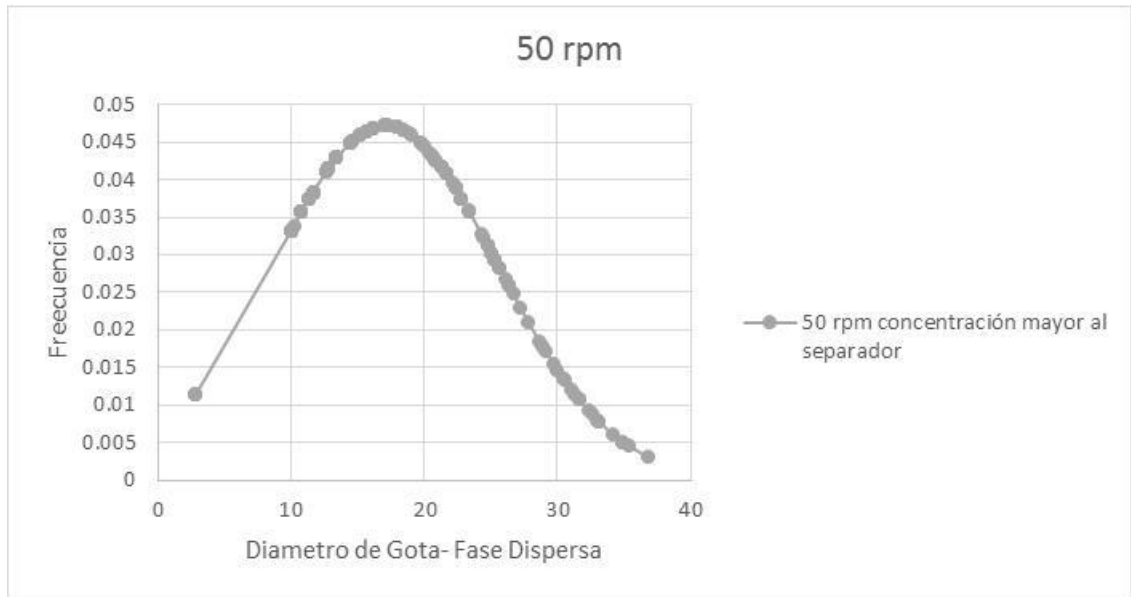
**Fig. 31** Emulsión 50 rpm concentración mayor de separador



**Fig. 32** Imagen binaria emulsión 50 rpm concentración mayor de separador



**Gráfica 3.** Distribución normal emulsión 50 rpm concentración mayor de separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 17.0914978 \mu\text{m}$

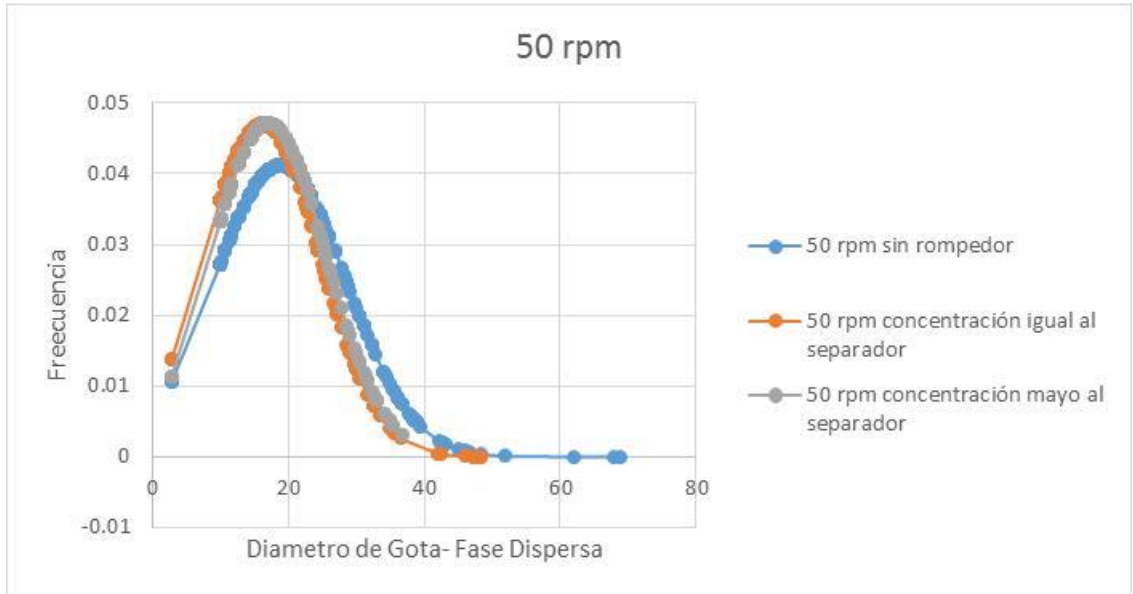
Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 59.464 \mu\text{m}$

Mediana:  $14.422 \mu\text{m}$

Desviación estándar:  $8.4494$

- **ANALISIS A 50 RPM**

**Gráfica 4.** Distribuciones normales de 50 rpm



Se observa que el nivel de agitación a 50 rpm no es tan significativo en el cambio del comportamiento de la emulsión, aunque aplicando el rompedor en las dos diferentes concentraciones observamos como el diámetro promedio de cada uno de los escenarios disminuye, corroborando con el fenómeno que ocurre al disminuir el tamaño de la gota.

**Tabla 4.** Promedio de diámetros obtenidos con cada una de las concentraciones del rompedor utilizado ( $\mu\text{m}$ )

Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Muestra de Crudo Limpio Cabeza de Pozo (sin rompedor)	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración 800 ppm Muestra Separador	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración mayor a la del separador 1600 ppm
18.814	16.1477	17.091

#### 4.4 EMULSIÓN 500RPM SIN ROMPEDOR

Fig. 33 Emulsión 500rpm sin rompedor

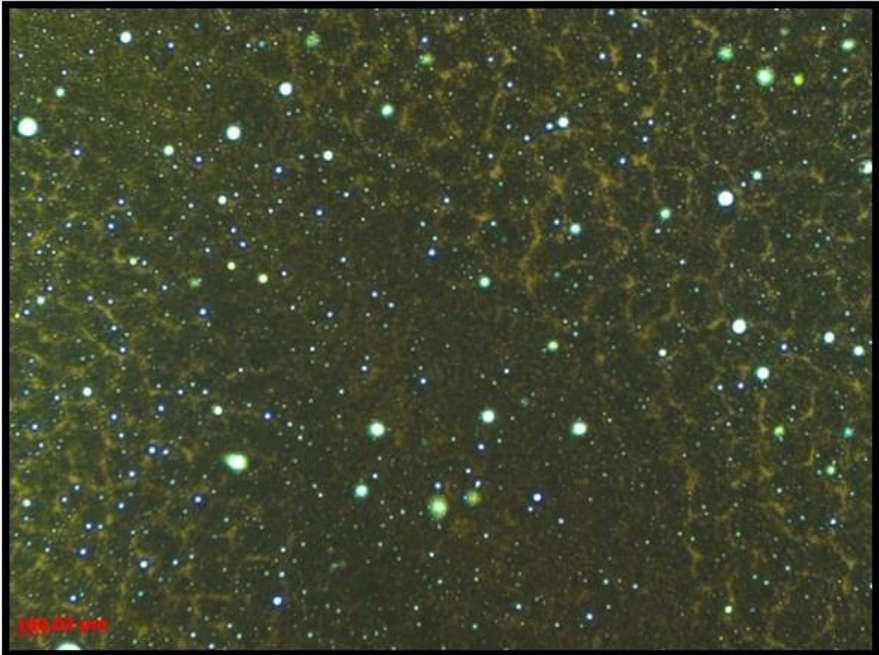
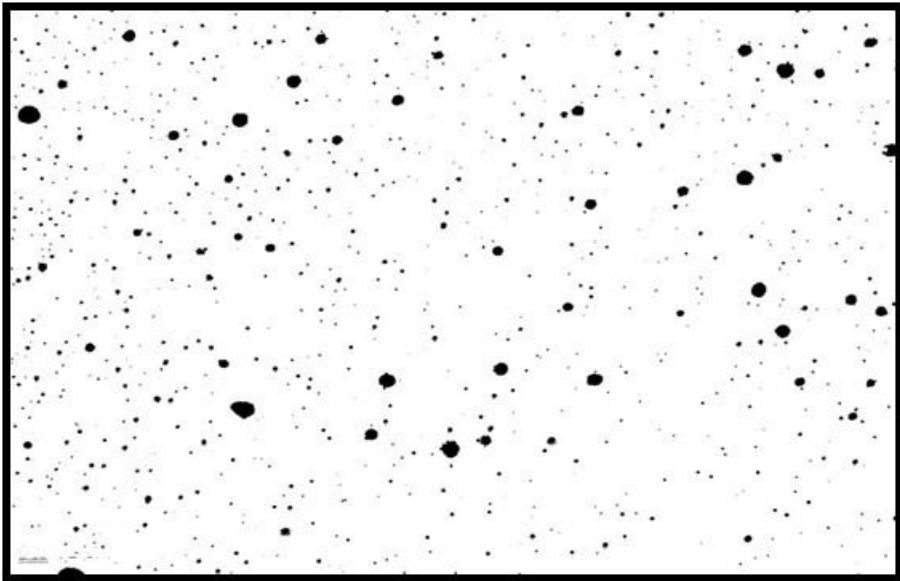
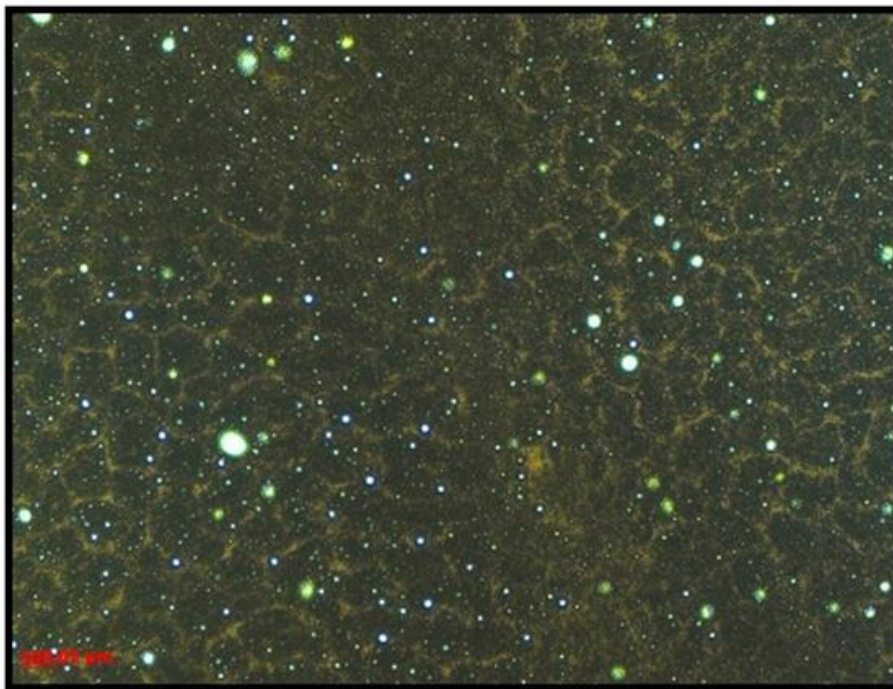


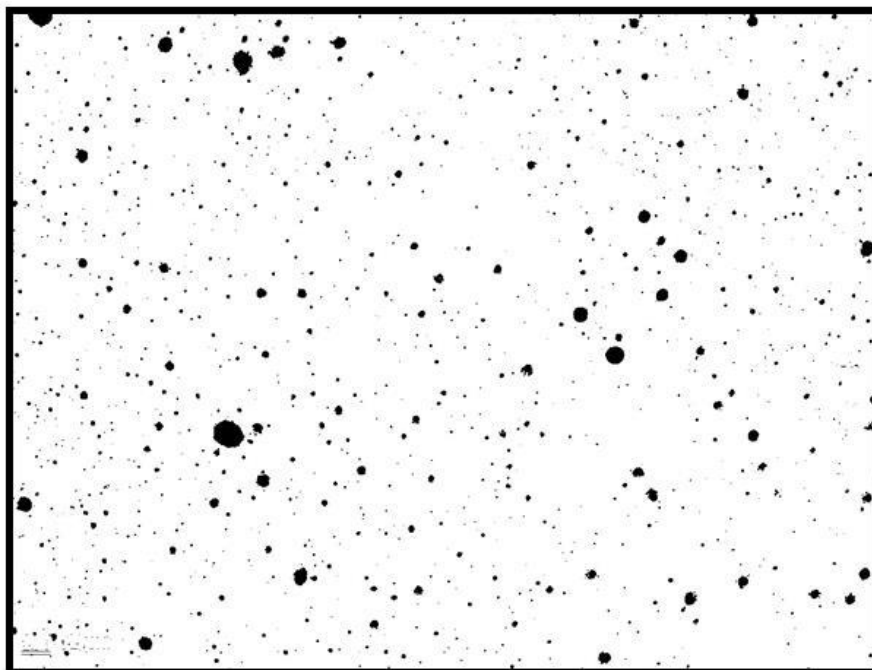
Fig. 34 Imagen binaria emulsión 500rpm sin rompedor



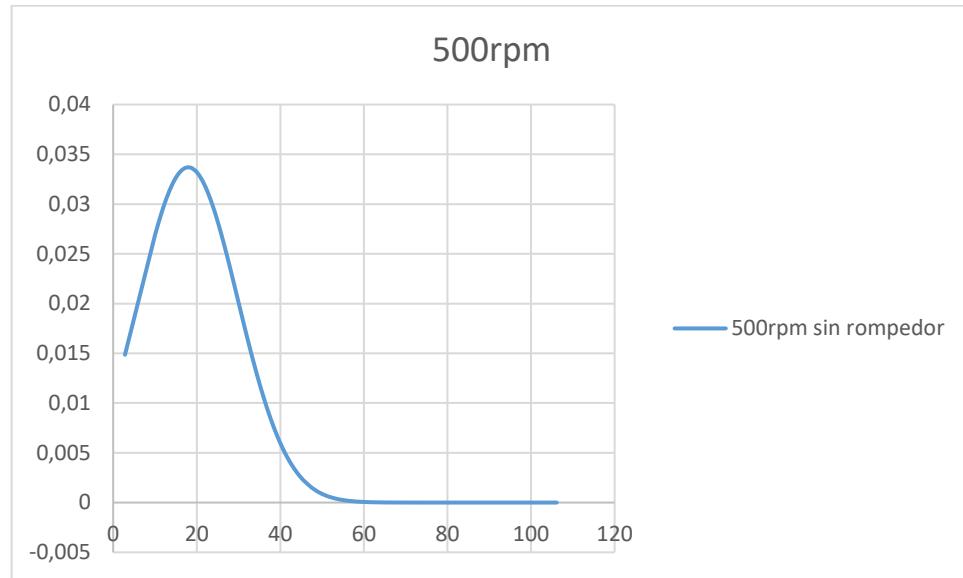
**Fig. 35** Emulsión 500rpm sin rompedor



**Fig. 36** Imagen binaria emulsión 500rpm sin rompedor



**Gráfica 5. Distribución normal 500 rpm limpio**



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 17.976 \mu\text{m}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 106.151 \mu\text{m}$

Mediana:  $17.976 \mu\text{m}$

Desviación estándar:  $11,83907274$

### 4.5 EMULSIÓN 500RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR

Fig. 37 Emulsión 500rpm concentración separador

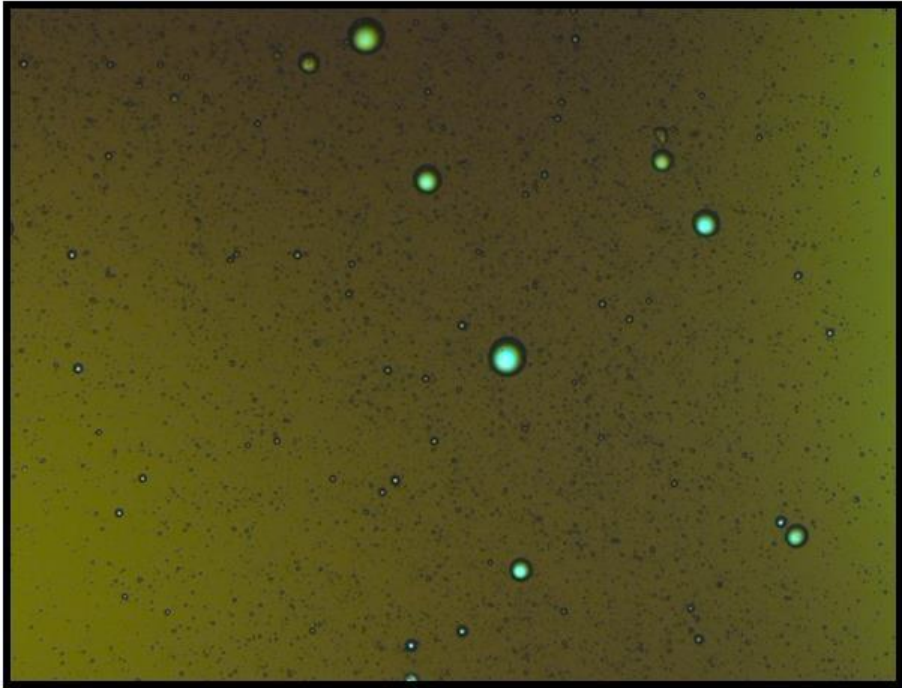
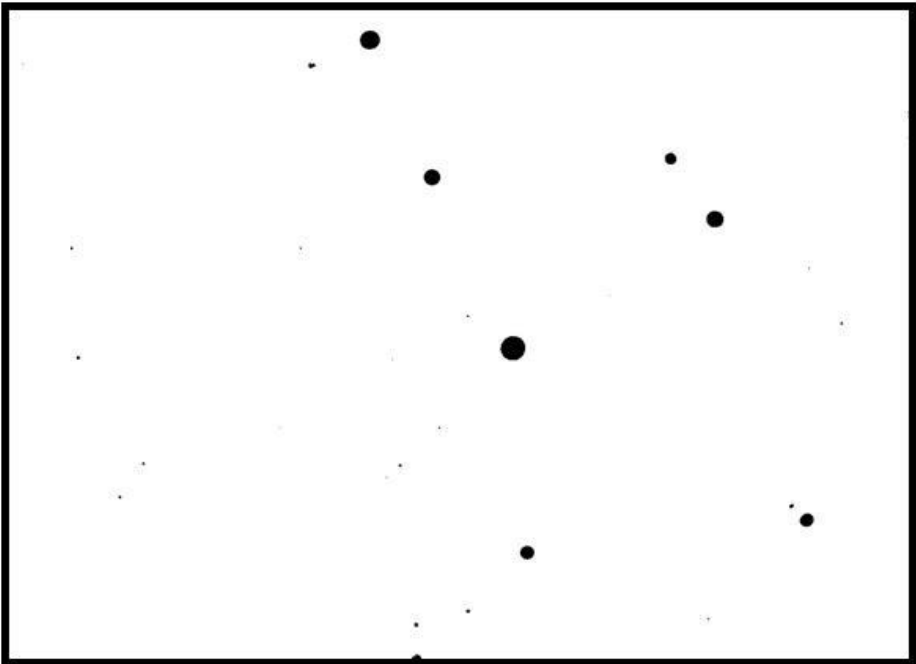
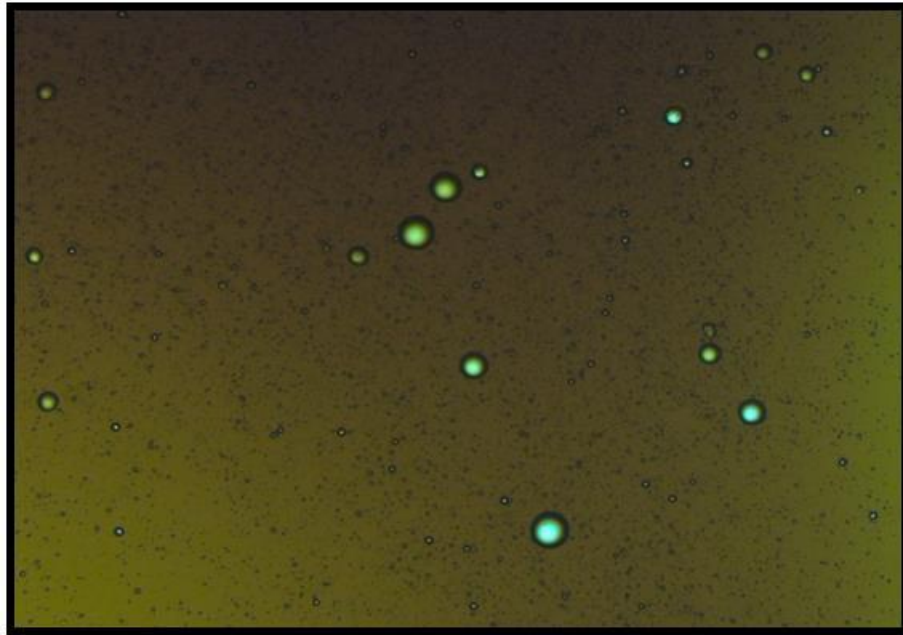


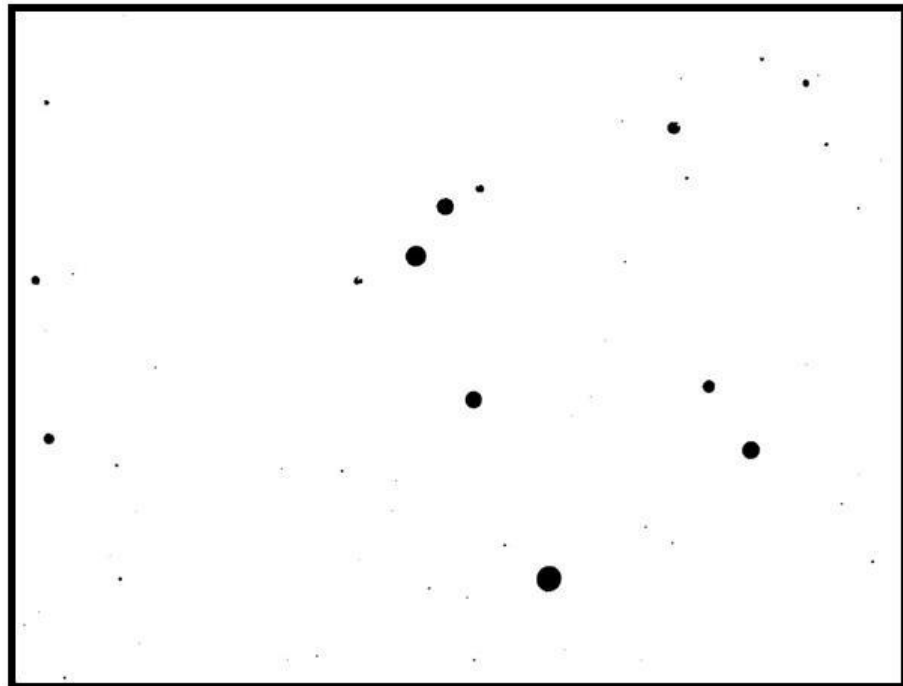
Fig. 38 Imagen binaria emulsión 500rpm concentración separador



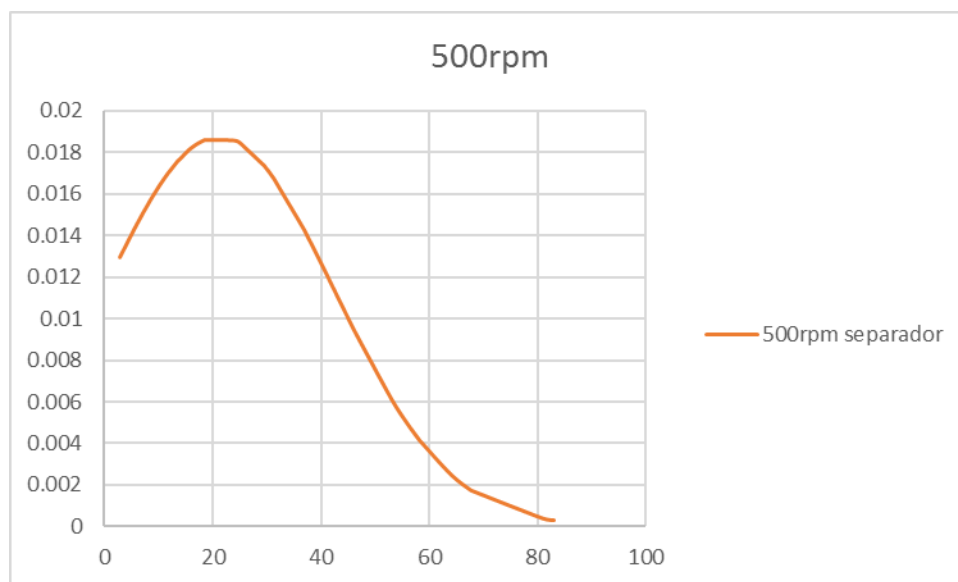
**Fig. 39** Emulsión 500rpm concentración separador



**Fig. 40** Imagen binaria emulsión 500rpm concentración separado



**Gráfica 6.** Distribución normal emulsión 500rpm concentración separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 21.132 \text{ um}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 82.97 \text{ um}$

Mediana: 11,662

Desviación estándar: 21,2663522

#### 4.6 EMULSIÓN 500RPM CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR

Fig. 41 Emulsión 500rpm concentración mayor que separador

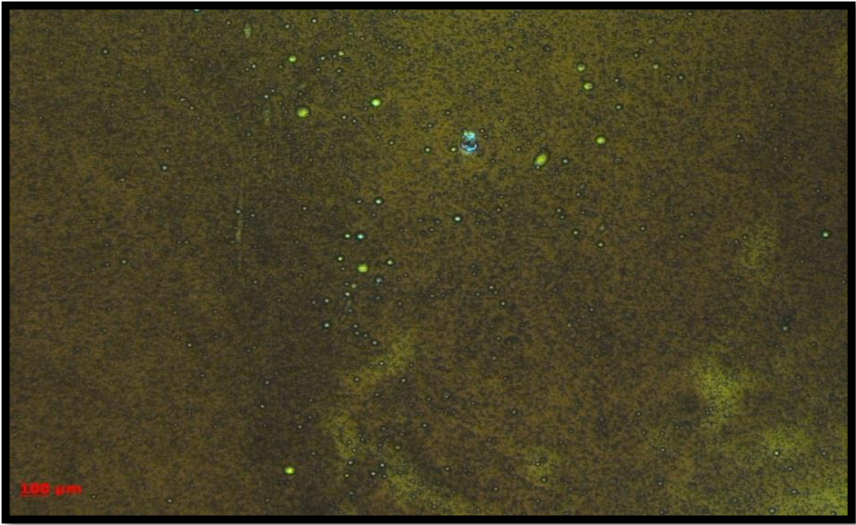
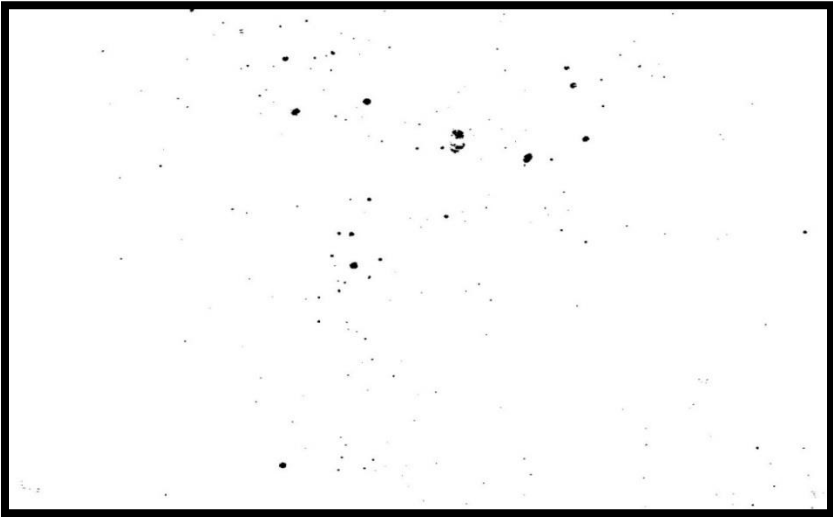
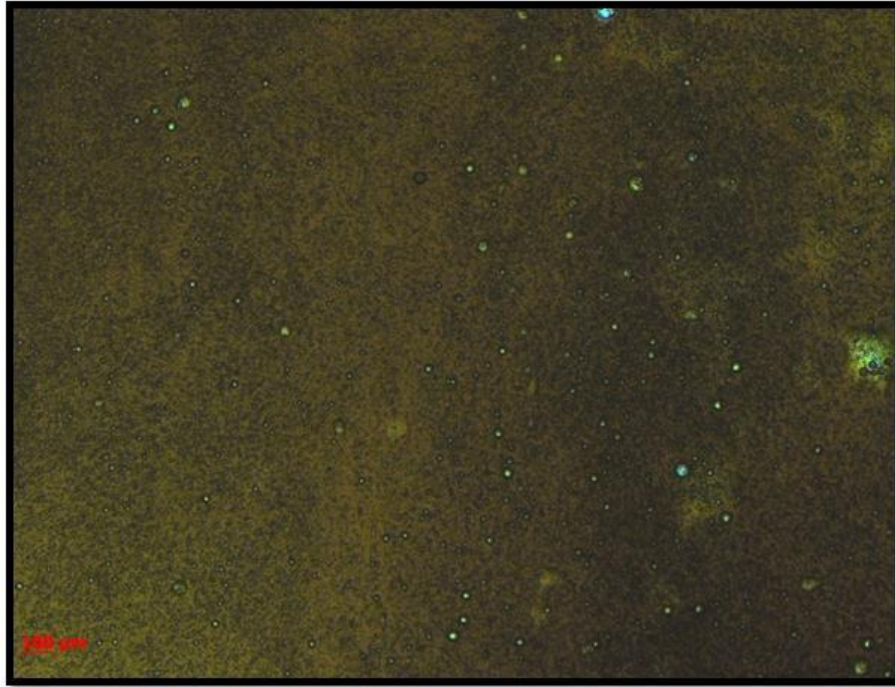


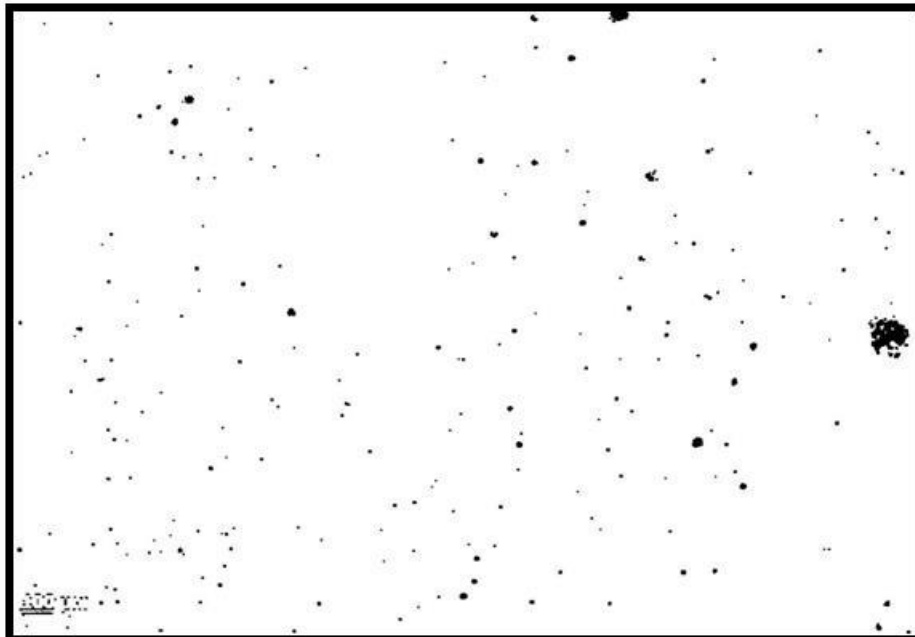
Fig. 42 Imagen binaria emulsión 500rpm concentración mayor que separador



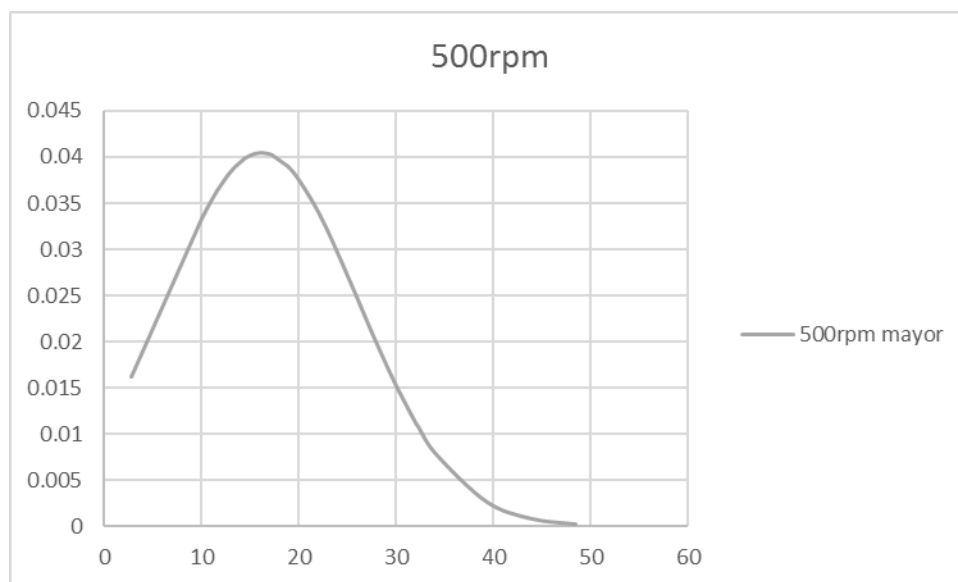
**Fig.43** Emulsión 500rpm concentración mayor que separador



**Fig. 44** Imagen binaria emulsión 500rpm concentración mayor que separador



**Gráfica 7.** Distribución normal emulsión 500rpm concentración mayor que separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 16.192 \mu\text{m}$

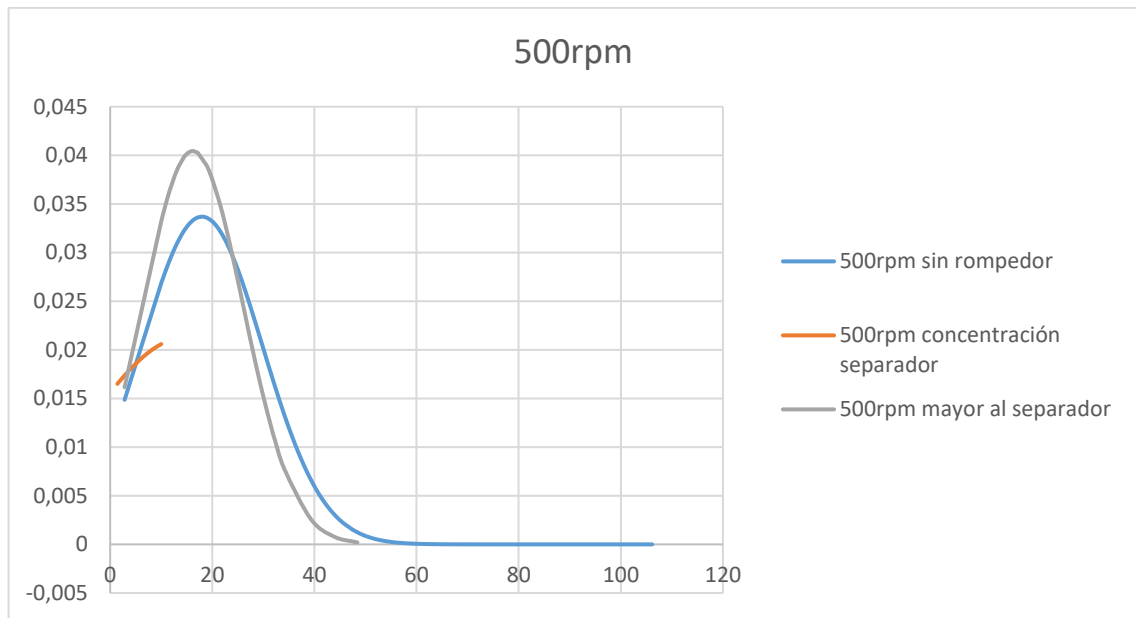
Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 48.415 \mu\text{m}$

Mediana: 12,806

Desviación estándar: 9,86425736

- **ANALISIS 500 RPM**

**Gráfica 8.** Distribuciones normales 500 rpm



En este segundo escenario se establece un nivel de agitación superior a 500 rpm, lo que representa la aplicación de un gran nivel de energía, teniendo en cuenta cada concentración en cada lugar del estudio, aún se observa una disminución notable de los diámetros de la gota, al aplicar concentraciones mayores a las del separador e incluso existe una diferencia entre el separador y la muestra limpia.

**Tabla 5.** Promedio de diámetros a diferentes concentraciones de rompedor para una velocidad de agitación de 500 rpm ( $\mu\text{m}$ )

Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Muestra de Crudo Limpio Cabeza de Pozo (sin rompedor)	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración 800 ppm Muestra Separador	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración mayor a la del separador 1600 ppm
17.976	21.132	16.192

#### 4.7 EMULSIÓN 1000RPM SIN ROMPEDOR

Fig. 45 Emulsión 1000rpm sin rompedor

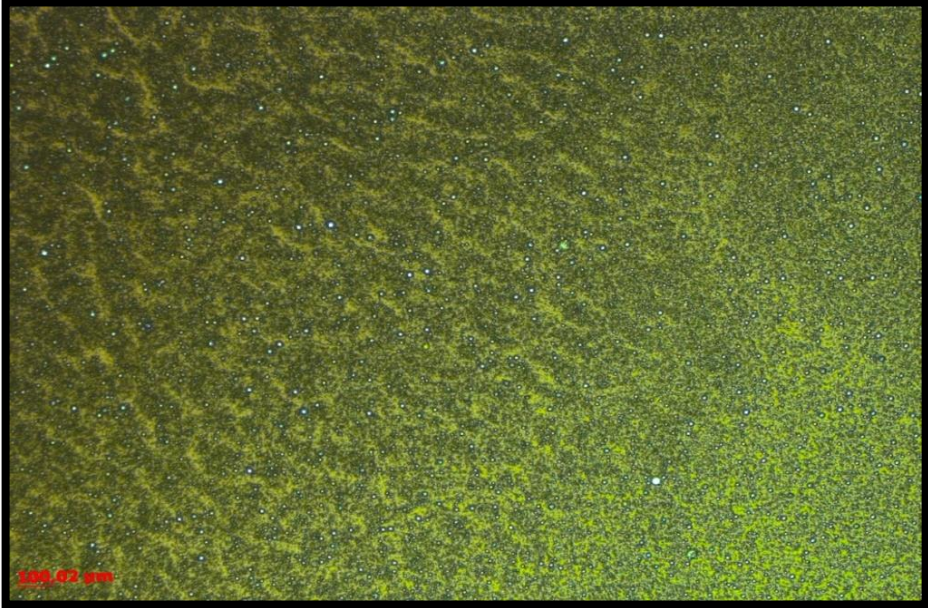
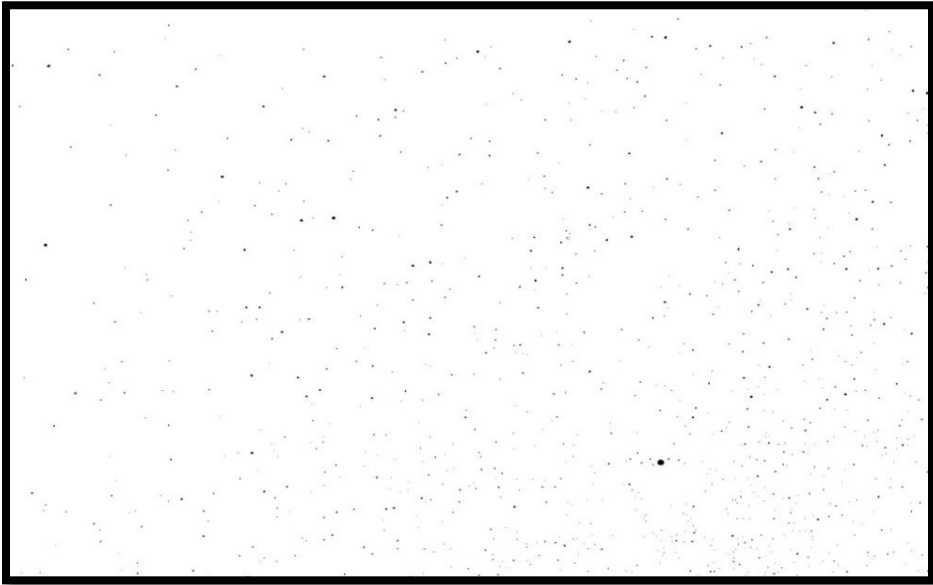
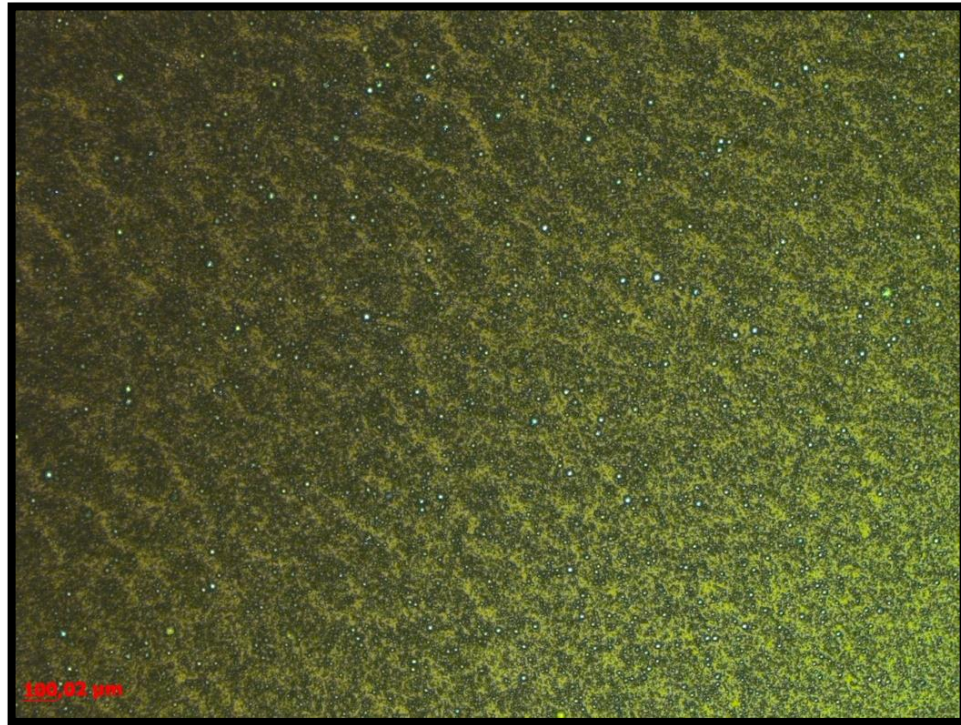


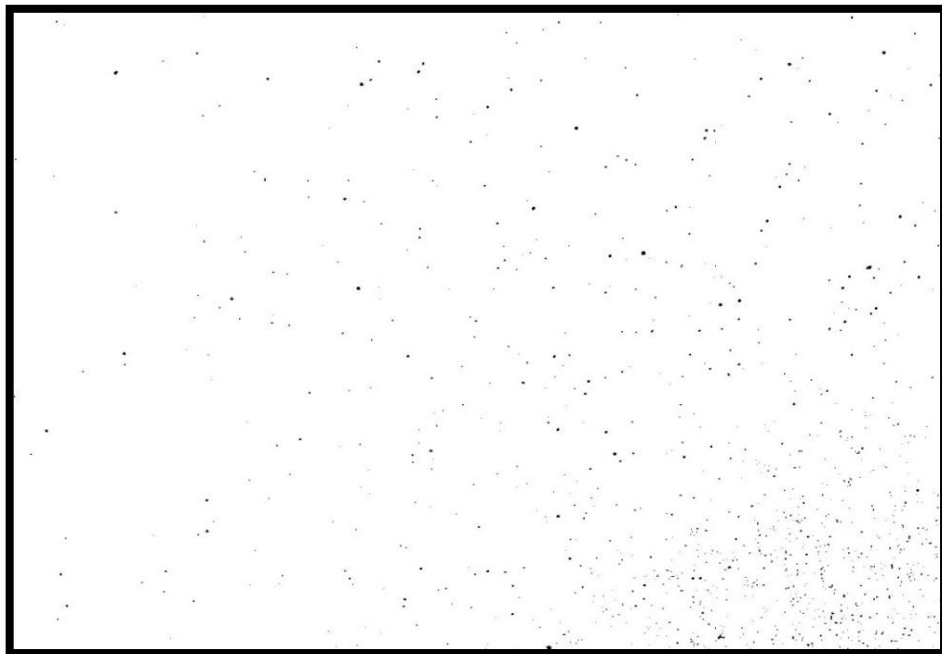
Fig. 46 Imagen binaria emulsión 1000rpm sin rompedor



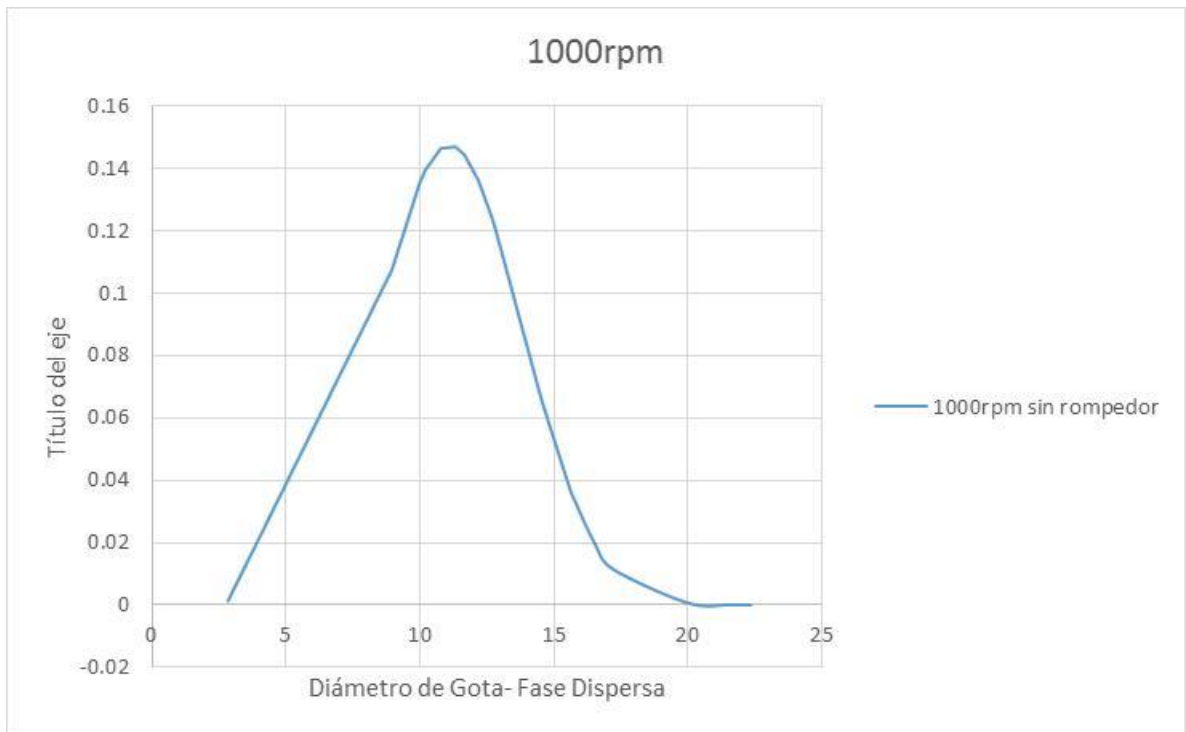
**Fig. 47** Emulsión 1000rpm sin rompedor



**Fig. 48** Imagen binaria emulsión 1000rpm sin rompedor



**Gráfica 9.** Distribución normal emulsión 1000rpm sin rompedor



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 11.094 \mu\text{m}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 22.361 \mu\text{m}$

Mediana: 10,77

Desviación estándar: 2,70416676

#### 4.8 EMULSIÓN 1000RPM CONCENTRACIÓN SEPARADOR

Fig. 49 Emulsión 1000rpm concentración separador

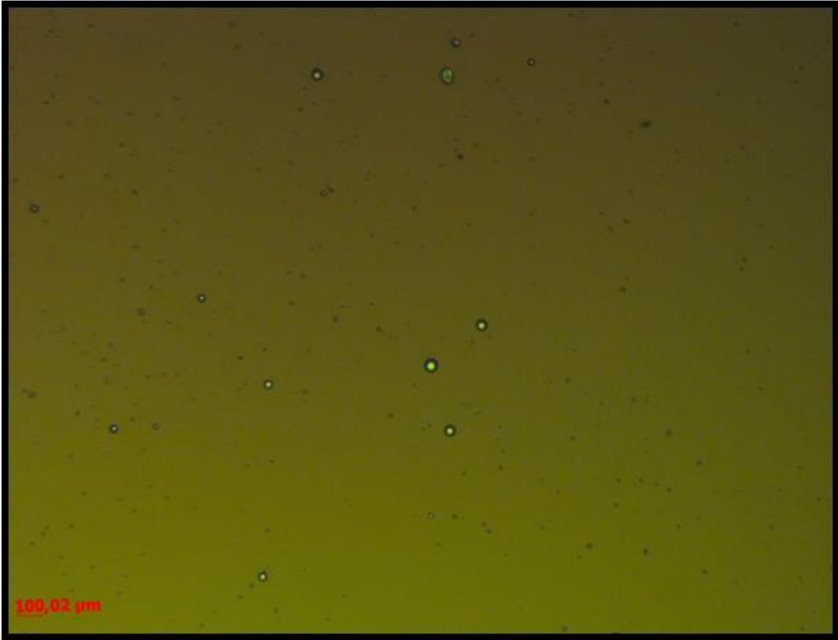
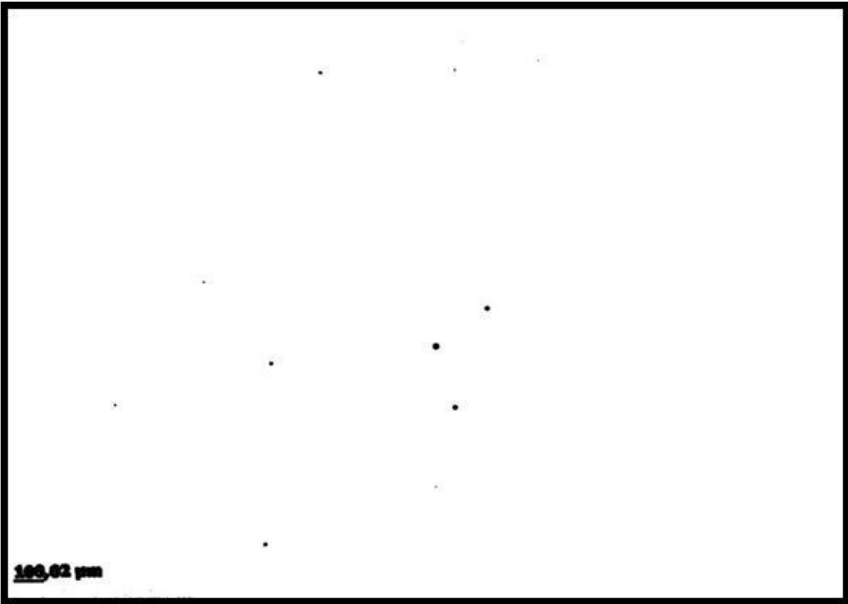
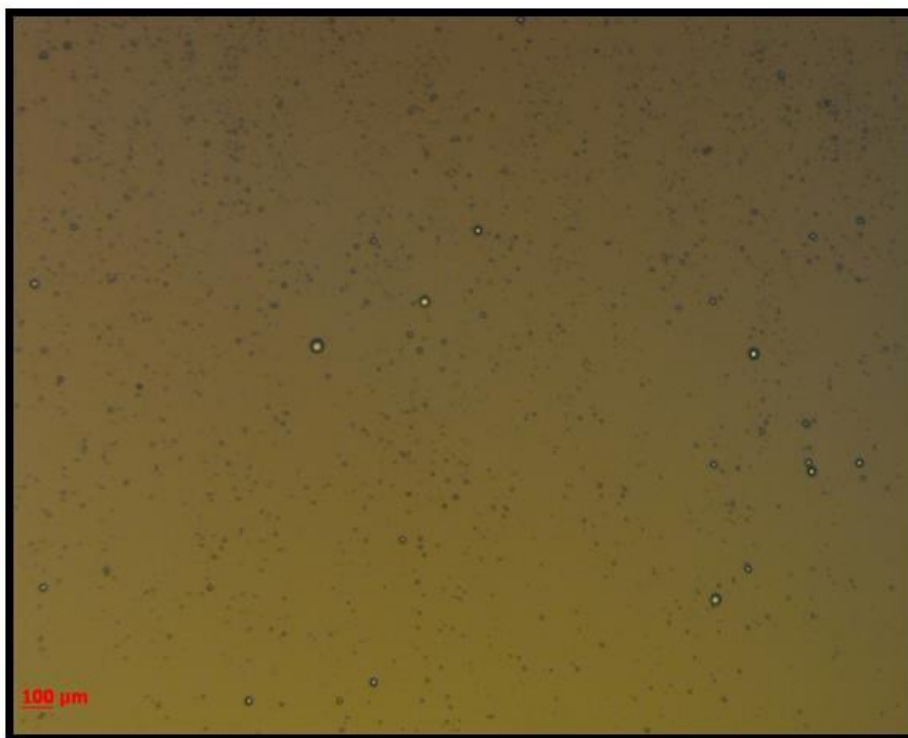


Fig. 50 Imagen binaria emulsión 1000rpm concentración separador



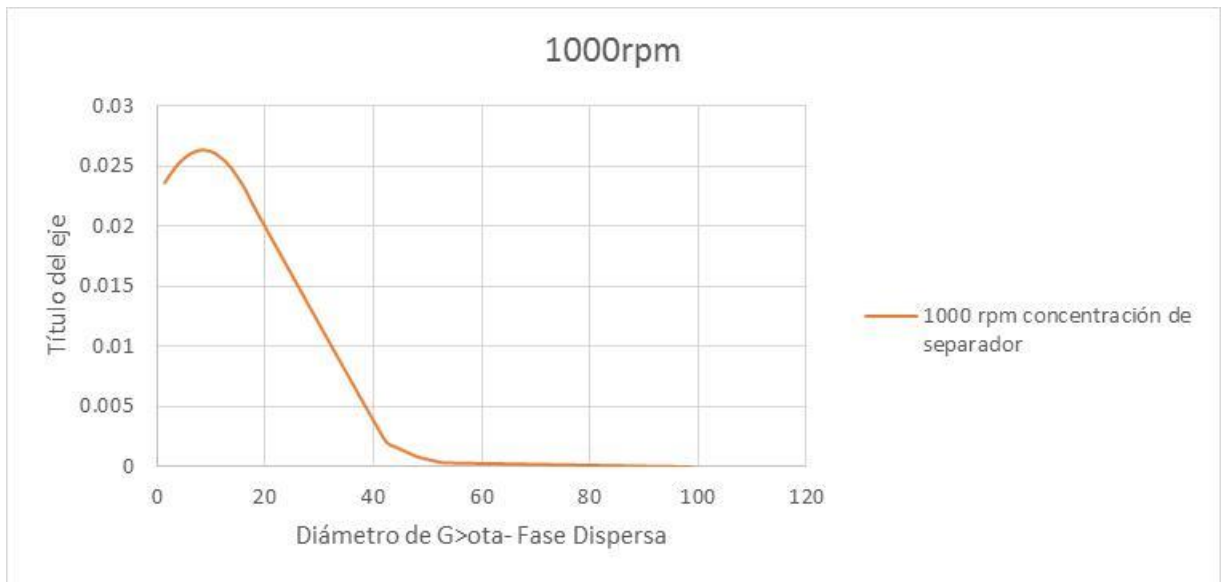
**Fig. 51** Emulsión 1000rpm concentración separador



**Fig. 52** Imagen binaria emulsión 1000rpm concentración separador



**Gráfica 10.** Distribución normal emulsión 1000rpm concentración separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 8.497 \text{ um}$

Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 98.671 \text{ um}$

Mediana: 3,606

Desviación estándar: 15,1335971

#### 4.9 EMULSIÓN 1000RPM CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR

Fig. 53 Emulsión 1000rpm concentración mayor que separador

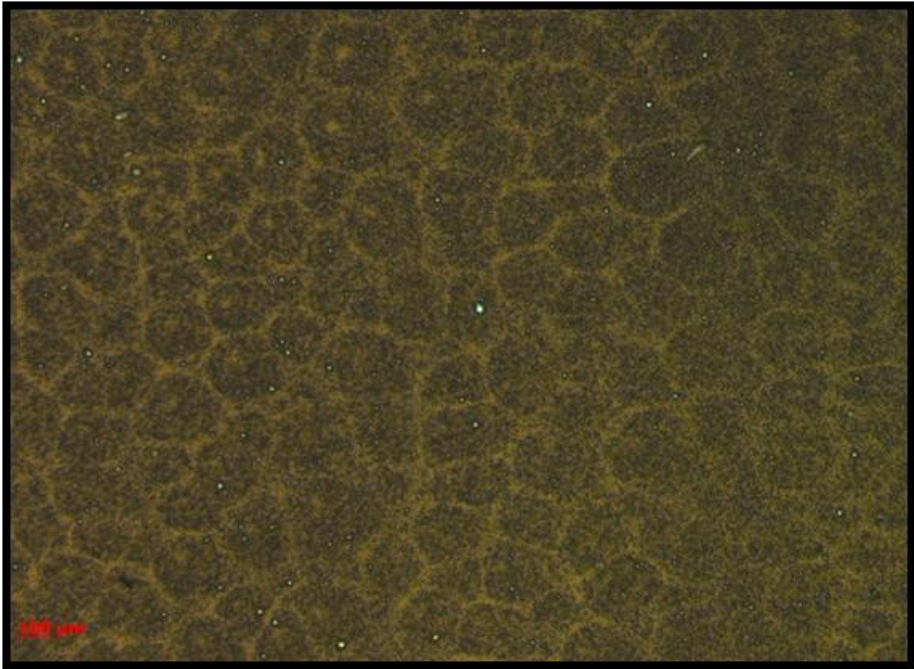
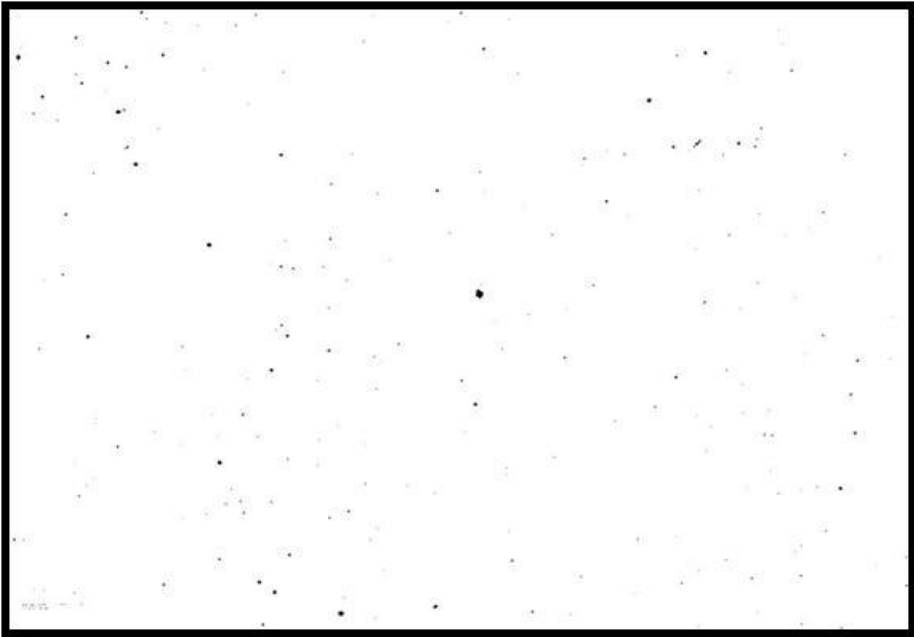
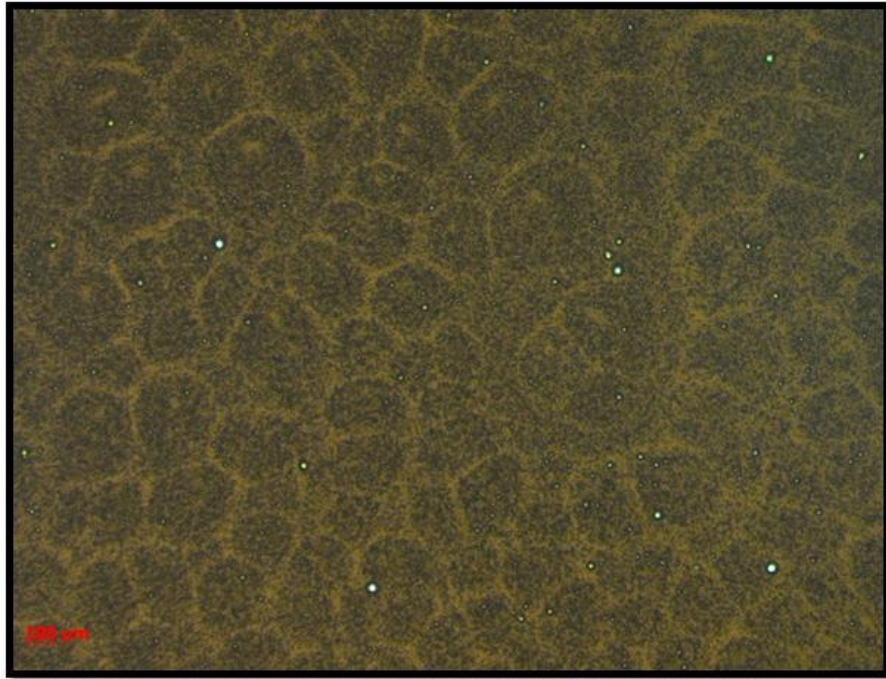


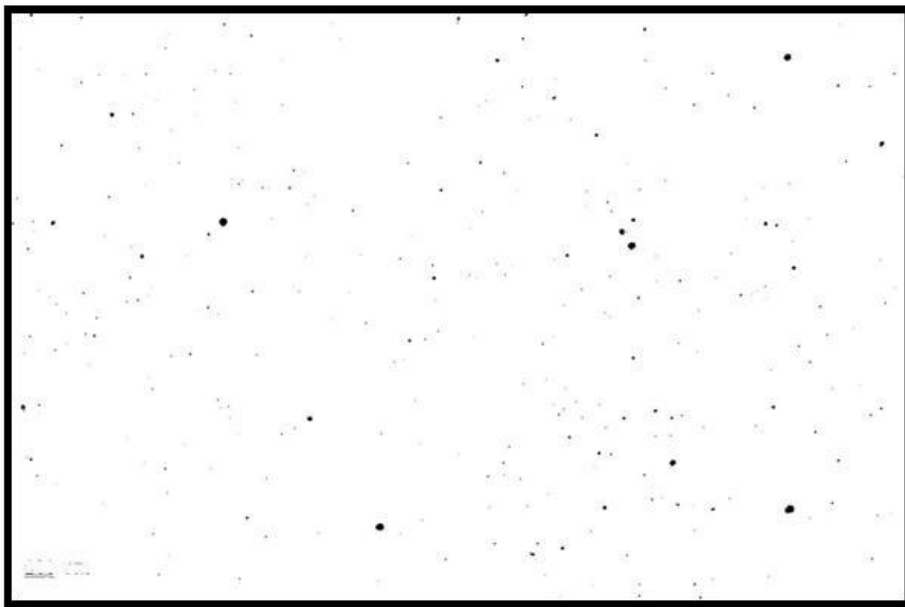
Fig. 54 Imagen binaria emulsión 1000rpm concentración mayor que separador



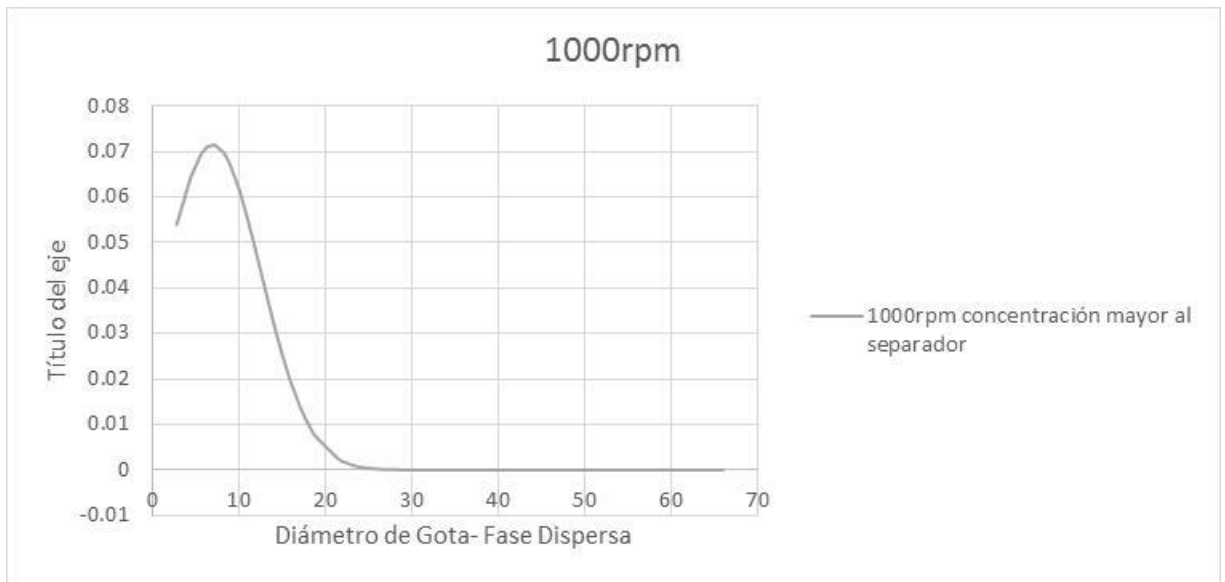
**Fig. 55** Emulsión 1000rpm concentración mayor que separador



**Fig. 56** Imagen binaria emulsión 1000rpm concentración mayor que separador



**Gráfica 11.** Distribución normal emulsión 1000rpm concentración mayor que separador



Información obtenida a partir de los datos del programa ImageJ

Diámetro promedio de la gota  $d = 7.012 \mu\text{m}$

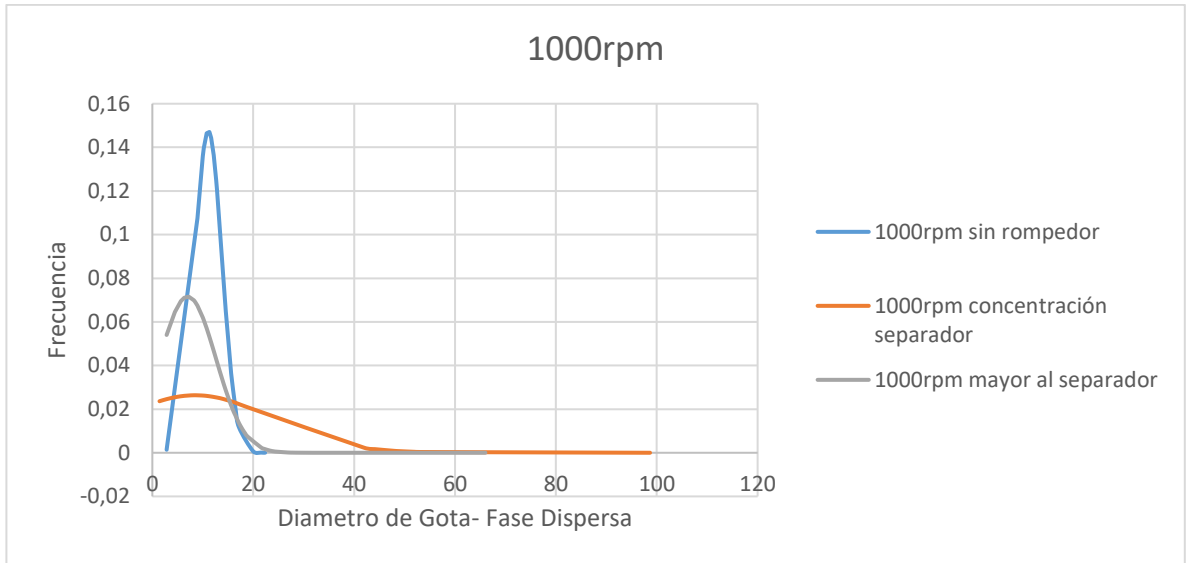
Diámetro máximo encontrado  $d_{\text{max}} = 66.03 \mu\text{m}$

Mediana: 5,657

Desviación estándar: 5,572

- **ANÁLISIS 1000 RPM**

**Gráfica 12.** Distribución normal 1000 rpm a diferentes concentraciones de rompedor



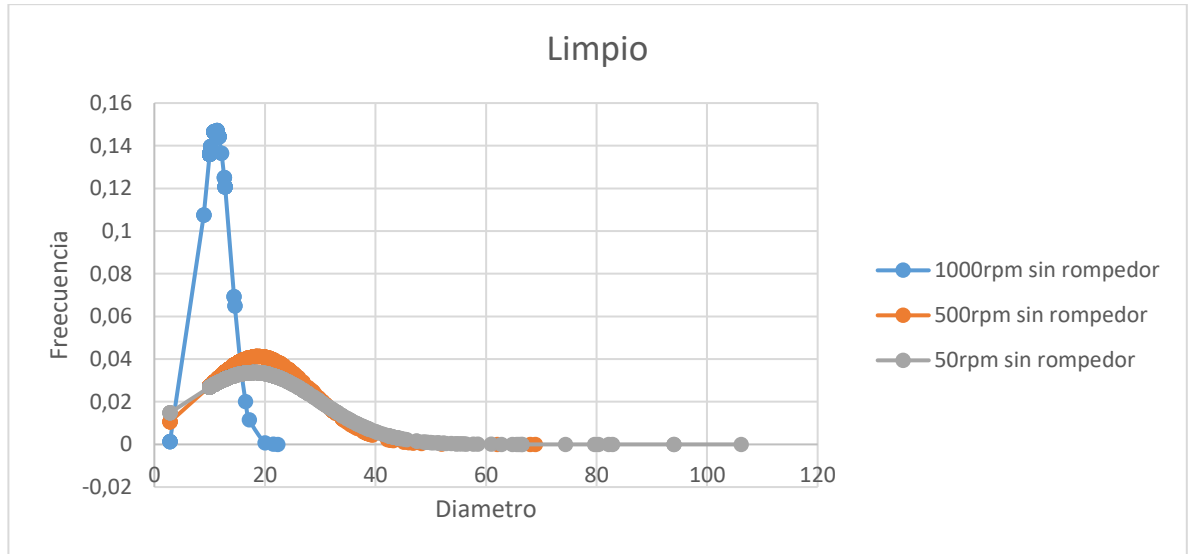
**Tabla 6.** Promedio de diámetros a diferentes concentraciones de rompedor para una velocidad de agitación de 1000 rpm.

Díametro ( $\mu\text{m}$ ) Muestra de Crudo Limpio Cabeza de Pozo (sin rompedor)	Díametro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración 800 ppm Muestra Separador	Díametro ( $\mu\text{m}$ ) Concentración Mayor a la del Separador 1600 ppm
11.094	8.497	7.012

Cuando se aplica una agitación en el nivel mayor, siendo éste 1000 rpm observamos un cambio de forma significativa en cuanto al tamaño de las partículas, incluso entre cada concentración existe un cambio realmente evidente, logrando que a puntos de separador y concentraciones mayores disminuya el tamaño de una manera muy rápida y de forma brusca.

#### 4.10 ANÁLISIS ESTADO LIMPIO SIN ROMPEDOR

**Gráfica 13.** Distribución normal emulsión sin rompedor a diferentes revoluciones.



**Tabla 7.** Diámetros a diferentes velocidades de agitación de la emulsión sin rompedor ( $\mu\text{m}$ ).

Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación 50 rpm	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación 500 rpm	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación 1000 rpm
18.814	17.976	11.094

Se observa de manera clara el comportamiento de la distribución del tamaño de la partícula al aumentar de manera considerable el nivel de agitación de la emulsión, el cambio más representativo ocurre al aplicar 20 veces más la agitación inicial.

#### 4.11 ANÁLISIS ESTADO A CONCENTRACIÓN DE SEPARADOR

Gráfica 14. Distribución normal concentración de separador

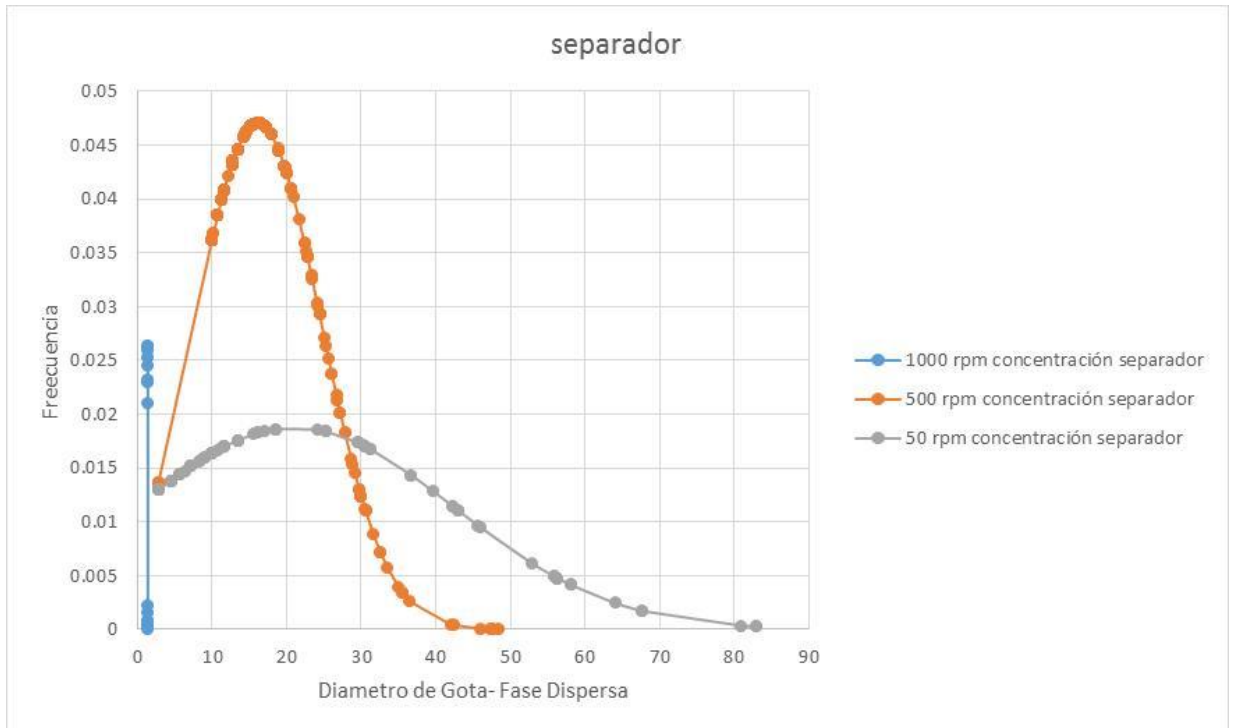


Tabla 8. Promedio de diámetros a diferentes velocidades de agitación para la emulsión a una concentración de rompedor igual a la del separador ( $\mu\text{m}$ ).

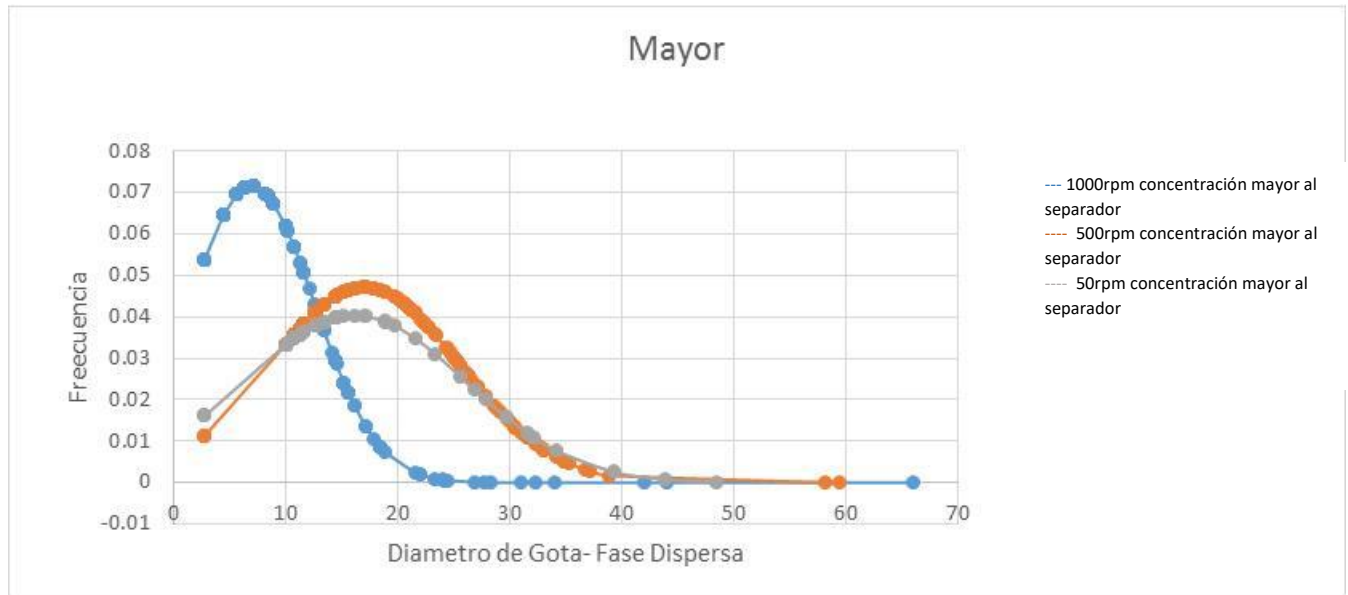
Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>50 rpm</b>	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>500 rpm</b>	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>1000 rpm</b>
16.1477	21.132	8.497

Tomando la concentración a nivel de separador, se observa la disminución del tamaño de partícula de una forma mucho más evidente, lo que claramente hace notar el efecto que tiene el rompedor en la emulsión, esto concuerda con la teoría de emulsiones. Se tiene en cuenta que, aunque exista una menor dispersión en el nivel de agitación de 50 rpm, también ve claramente que la distribución de 500 rpm

existe una gran cantidad de datos a la izquierda del valor promedio, lo que ofrece la certeza que el diámetro disminuye, gracias a la intensidad de la agitación.

#### 4.12 ANÁLISIS ESTADO CONCENTRACIÓN MAYOR QUE SEPARADOR

**Gráfica 15.** Distribución normal concentración mayor que separador



**Tabla 9.** Promedio de diámetros a diferentes velocidades de agitación para la emulsión a una concentración de rompedor igual a la del separador ( $\mu\text{m}$ ).

Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>50 rpm</b>	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>500 rpm</b>	Diámetro ( $\mu\text{m}$ ) Para velocidad de agitación <b>1000 rpm</b>
17.091	16.192	7.012

En el último nivel de agitación estudiado, 1000 rpm se observa cambios realmente interesantes con respecto a los otros escenarios, uno de ellos es la disminución de manera acelerada del diámetro de la partícula con respecto a los otros mismos escenarios, pero a niveles de agitación menores.

Lo que fácilmente logrará que la emulsión sea inestable gracias al efecto combinado del rompedor y de la agitación excesiva.

Al analizar la viscosidad de las muestras, se puede observar que la tendencia varía en cada una de ellas, a partir de la teoría se sabe que la viscosidad de una emulsión generalmente aumenta a medida que disminuye el tamaño de la gota en la fase dispersa; pero existen diferentes factores que afectan estos resultados, tales como la homogeneidad en la distribución de tamaños de diámetro de gota y la presencia de químicos en la muestra lo cual hace que los valores de la viscosidad cambien.

En este trabajo no se reportaron datos exactos de viscosidad debido a que al deshidratar el crudo, hubo una disminución notable del volumen inicial, razón por la cual al aplicar la concentración mayor de químico (1600 ppm), estas muestras no arrojan datos coherentes para poder hacer su comparación.

## 5. CONCLUSIONES

- Al hacer el análisis de los datos obtenidos del software se puede concluir que a mayor velocidad de agitación menor tamaño de gota.
- A medida que se aplica rompedor a la emulsión directa que fue analizada el comportamiento de su fase dispersa cambia, haciendo que la distribución de sus gotas sea diferente, los diámetros disminuyan e incluso algunas de ellas dejen de ser percibidas por el lente del microscopio.
- Al analizar las tendencias de distribución de tamaño de gota se puede observar que la frecuencia con la que se presenta homogeneidad en los tamaños de diámetro disminuye a medida que se aumenta la cantidad de rompedor aplicado.
- Tanto la velocidad de agitación como la concentración de rompedor agregado causa un efecto sobre la muestra, lo cual puede ser analizado a partir de software para identificar tendencias que pueden llegar a ser base de modelos aplicados para mejorar el transporte y especificaciones de entrega del crudo.
- Diámetros de gota disminuye pequeños y distribución de tamaño homogénea producen disminución de la viscosidad de la emulsión.

## RECOMENDACIONES

- Realizar más pruebas con la muestra de separador, es decir, la realización de todo el proceso tanto con el crudo limpio como con el de salida del separador.
- Tomar al menos 4 imágenes por prueba para que la base de datos sea mayor, la precisión del análisis aumente y la posibilidad de crear un modelo y/o correlaciones donde involucren más parámetros del crudo que contribuya a la mejora de transporte o especificaciones de entrega de crudo se incremente.
- Verificar la disponibilidad de equipos y el alcance de los mismos para realizar un proceso más preciso y avanzado.

## BIBLIOGRAFÍA

ARNOLD K. & STEWART M. Surface Production Operations, Design of oil handling System and Facilities, Vol. 1. Tercera edición. Gulf Professional Publishing, 2008.

ASTM D88. Standard test method for Saybolt viscosity.

ASTM D287. Standard test method for API gravity of crude petroleum and petroleum products (hydrometer method).

BRYAN, J., KANTZAS, A. & BELLEHUMEUR, C. Viscosity Prediction for Crude Oils and Crude Oil Emulsions Using Low Field NMR., 2002.

BRYAN, J., MIROTCHNIK, K. & KANTZAS, A. Viscosity Determination of Heavy Oil and Bitumen Using NMR Relaxometry, 2003.

DENKOVA, P. S. y otros. Evaluation of the precision of drop-size determination in oil/water emulsion by low-resolution NMR spectroscopy, 2004.

FLANIGAN D. STOLHAND J. SCRIBNER M. SHIMODA E. Droplet size analysis: a new tool for improving oilfield separations. SPE 18204 -MS. Conoco Inc. SPE members. 1988.

GRIFFIN, W. C. Encyclopedia of Chemical Technology. New York: Interscience, 2012.

KILPATRICK P.K. Water-in-crude Oil Emulsion Stabilization: Review and Unanswered Questions. Vol. 26, 2012.

KOKAL, S. Crude oil emulsions: a state of the art review, 2005.

KOKAL, S. & AL-DOKHI, M. Case studies of emulsion Behavior at Reservoir Conditions, 2008.

LANGEVIN, D., POTEAU, S., HENAUT, I. & ARGILLIER, J. F. Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation, 2004.

PACKER, K. J. & REES, C. Pulsed NMR studies of restricted diffusion. I. droplet size distribution in emulsions.. Journal of Colloid and Interface Science, 1972.

PAL, R, Effect of Droplet size on the Rheology of Emulsions, 1996.

SAJJADI, S., ZERFA, M. & BROOKS, B. W. Dynamic behaviour of drops in oil/water/oil dispersions, 2002.

SANDOVAL RODRIGUEZ, L. S. Evaluación de la formación de emulsiones agua-en-aceite sobre la viscosidad y las propiedades PVT en crudos pesados, Bucaramanga: s.n., 2014

SCHICK, M. J. & HUBBARD, A. T. Emulsion and Emulsion Stability. Segunda edición. California: Taylor & Francis Group. LLC.

VAN DER ZANDE M. JANSSEN P. VAN DEN BROEK W. Size of oil droplets under high – water – cut conditions. Delft university of technology and Institut Français du pétrole. 2001.

VERNON SMITH, H. & ARNOLD, K. E. Crude oil emulsions, 2002.