UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

"REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA EN EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS"

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN PETRÓLEO

AUTOR:

LISSETTE ESTEFANÍA LÓPEZ SANTILLÁN

TUTOR:

ING. FRANCISCO JAVIER MONTALVÁN TOALA, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2018

UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

“REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA EN EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS”

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN PETRÓLEO

PRESENTADO POR:

LÓPEZ SANTILLÁN LISSETTE ESTEFANIA

TUTOR:

ING. FRANCISCO JAVIER MONTALVÁN TOALA, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2018

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, LÓPEZ SANTILLÁN LISSETTE ESTEFANÍA, con C.I.: 0927308643, declaro bajo juramento que el trabajo descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual de la normativa institucional vigente.

Atentamente

_____

Srta. López Santillán Lissette Estefanía
C.I. 0927308643

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de titulación denominado: “REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA EN EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS”, desarrollado por la estudiante Srta. **López Santillán Lissette Estefanía** egresada de la Carrera de Ingeniería en Petróleo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del Título de Ingeniera en Petróleo.

Me permito declarar que luego de haber dirigido, estudiado y revisado, apruebo en su totalidad este trabajo de investigación y autorizo a la estudiante para que inicie los trámites legales correspondientes.

Atentamente

_____

Ing. Francisco Javier Montalván Toala. MSc.
C.I. 0918533415
DOCENTE TUTOR

CERTIFICADO DEL GRAMATÓLOGO

Dra. Marianela Silva Sánchez.

Cédula de identidad: 0962550133

Número de celular: 0999504411

Salinas- Provincia de Santa Elena.

Ecuador

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Yo, Dra. Marianela Silva Sánchez, certifico que he revisado la redacción, estilo y ortografía del contenido del proyecto de investigación: **Representación gráfica del comportamiento de la viscosidad cinemática en emulsiones de crudos pesados;** elaborado por **Lissette Estefanía López Santillán,** cédula de ciudadanía 0927308643; presentado como requisito académico previo a la obtención del título de Ingeniera en Petróleo, en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Carrera de Ingeniería en Petróleo.

El mencionado trabajo, en el contexto general, cumple con los requisitos de redacción, estilo y ortografía para el uso del idioma español.

Certificación que otorgo para fines académicos pertinentes, en la ciudad de Santa Elena a los veinticuatro días del mes de agosto del dos mil dieciocho.

Certifica,

Dra. Marianela Silva Sánchez

Licenciada en educación: SENESCYT número 862194454

Doctora en ciencias de la educación: SENESCYT número 8622110183

Especialista en Psicología Educacional

Diplomada en Metodología de investigación cualitativa

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

001-FMT-2018

En calidad de tutor del Trabajo de titulación denominado "REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA EN EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS", elaborado por la estudiante LISSETTE ESTEFANÍA LÓPEZ SANTILLÁN, egresada de la carrera de Ingeniería en Petróleo, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniera en Petróleo, me permito declarar que una vez analizado en el sistema anti plagió URKUND, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con el 3% de la valoración permitida por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Atentamente

Ing. Francisco Javier Montalván Toala, MSc.
C.I. 0918533415
DOCENTE TUTOR

AGRADECIMIENTO

La elaboración de este trabajo de investigación representa el logro del objetivo final de mi etapa académica y el comienzo de mi vida profesional, en él se refleja el esfuerzo y dedicación para alcanzarlo, junto a la presencia de mis seres queridos, para ellos mi eterna gratitud.

A Dios, por darme la sabiduría, fortaleza y sobre todo confianza para siempre seguir adelante con mis propósitos, y así culminar mi etapa académica cumpliendo cada objetivo trazado a lo largo de mi vida.

A ti Jeremy, hijo mío! que fuiste mi motivación más grande para culminar con esta larga etapa. Agradezco tu amor y apoyo incondicional, eres parte de mi lucha constante, con tu corta edad me has enseñado a jamás rendirme, a ser muy paciente y hacerle frente a las adversidades.

A mis hermanas Vero y Rosa, quienes siempre brindaron su mano cuando más lo necesité y supieron escuchar mis horas de frustración con tareas y exámenes que se presentaban a diario en la Universidad, dándome palabras de superación personal. Sin dejar de lado el apoyo de mí hermano menor Bryan, que cuidaba de mí cada vez que tenía la oportunidad de hacerlo.

Al Ingeniero Francisco Javier Montalván mi tutor de tesis, por su aporte, asesorías y enseñanzas durante el desarrollo de mi proyecto, siendo la persona que ha guiado y ayudado a enriquecer mis conocimientos, orientándome para poder cumplir con mi meta.

A los Ingenieros Alamir Álvarez y Carlos Portilla, por gestionar satisfactoriamente el permiso ante el decano de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, gracias al convenio entre la UPSE y ESPOL, permitiendo el uso del laboratorio de petróleo. Además por brindarme su amistad y aprecio durante ésta etapa académica.

A los Ingenieros Carlos Pulla y Jefferson López, por su ayuda para la obtención de las muestras de crudo pesado y demulsificante, lo que permitió cumplir con la parte analítica y experimental del proyecto, para así culminar mi trabajo de titulación.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad Ciencias de la Tierra, por permitir la realización de parte del proyecto de titulación, especial gratitud para el Ingeniero Xavier Salas por facilitar el uso total del laboratorio de petrofísica, en particular por permitir la utilización del viscosímetro Saybolt, con el cual obtuve los resultados requeridos para este estudio.

Agradezco a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por abrir sus puertas para mi formación profesional, al igual que sus docentes y compañeros de carrera, en especial a dos personas que fueron mis amigos durante este proceso académico: Jhajaira Nájera y Gabriel Merejildo, por el apoyo incondicional en todo aspecto y el cariño demostrado a diario. Gracias chicos! Y éxitos en su vida profesional.

LISSETTE LÓPEZ

DEDICATORIA

Llena de Amor y Satisfacción dedico mi proyecto de titulación a cada uno de mis seres queridos, quienes me han brindado su apoyo incondicional estando conmigo en momentos difíciles durante mi carrera universitaria. Este logro te lo dedico especialmente a ti Jeremy, me has motivado a seguir adelante y luchar siempre por conseguir el éxito. El esfuerzo diario que invertí en toda esta etapa me enseñó a crecer como persona y convertirme en tu madre ha sido lo mejor que me ha pasado, ya que eres ese motor diario que impulsó a terminar mi carrera. Fue un camino duro pero satisfactorio.

A mi hermana Vero, quien es un pilar fundamental a lo largo de mi vida y ha estado ahí siempre para velar por el bienestar de mi hijo en las ocasiones que tuve que estar ausente, sea por motivos académicos o laborales; tu apoyo y confianza me obligaron a esforzarme cada día más.

Por último, a una persona especial que no estuvo al inicio de mi carrera pero será muy gratificante culminar esta etapa juntos, te dedico parte de mi esfuerzo académico, por estar siempre pendiente de mí, que tuviera lo necesario, por ser un amigo incondicional y sobre todo por haberme brindado tu amor sin restricciones. Tu apoyo ha sido muy valioso y sumamente importante durante este proceso, por ello mi más sincera dedicatoria para ti.

LISSETTE LÓPEZ

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

_____	_____
Ing. Juan Garcés MSc. DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA	Ing. Marllelis Gutiérrez MSc. DIRECTORA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO
_____	_____
Ing. Raúl Morgner Mangold PROFESOR DE ÁREA	Ing. Francisco Javier Montalván MSc. TUTOR DE PROYECTO

_____
Abg. Víctor Coronel Ortiz MSc.
SECRETARIO GENERAL

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD INTELECTUAL iii

APROBACIÓN DEL TUTOR iv

CERTIFICADO DEL GRAMATÓLOGO v

CERTIFICADO ANTIPLAGIO vi

AGRADECIMIENTO vii

DEDICATORIA ix

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN x

ÍNDICE DE CONTENIDO xi

ÍNDICE DE FIGURAS xv

ÍNDICE DE TABLAS xvii

RESUMEN xviii

ABSTRACT xix

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA 3

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.3. OBJETIVOS 6

1.3.1. OBJETIVO GENERAL 6

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6

1.4. JUSTIFICACIÓN 7

1.5. METODOLOGÍA 7

CAPITULO II 11

FUNDAMENTOS TEÓRICOS **11**

2.1 GENERALIDADES DE LOS CRUDOS PESADOS **11**

2.1.1 DEFINICIÓN DE CRUDOS PESADOS 11

2.1.2 TIPIFICACIÓN DE CRUDOS 12

2.1.2.1 Gravedad API *13*

2.1.2.2 Contenido de Azufre *14*

2.1.2.3 Composición Química *15*

2.1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CRUDOS PESADOS 16

2.1.3.1 Viscosidad del Crudo *16*

2.1.3.2 Coloración del crudo *18*

2.1.3.3 Olor del crudo *18*

2.1.3.4 Solubilidad del crudo *19*

2.2 CONCEPTOS GENERALES DE EMULSIONES **19**

2.2.1 DEFINICIÓN 19

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES 20

2.2.2.1 Por la composición de las fases que la forman *20*

2.2.2.2 Por el tamaño de sus gotas *21*

2.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS EMULSIONES 22

2.2.4 APLICACIONES DE LAS EMULSIONES 22

2.2.5 CARACTERIZACIÓN DE EMULSIONES 23

2.2.6 ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES 24

2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS **25**

2.3.1 DEFINICIONES DE VISCOSIDAD 25

2.3.1.1 Viscosidad Dinámica *26*

2.3.1.2 Viscosidad Cinemática *26*

2.3.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD 27

2.3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD 28

2.3.4 TIPOS DE FLUIDOS 29

2.3.4.1 Fluidos Newtonianos *30*

2.3.4.2 Fluidos No Newtonianos *31*

CAPITULO III **33**

MATERIALES Y MÉTODOS **33**

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL VISCOSÍMETRO SAYBOLT **33**

3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL VISCOSÍMETRO SAYBOLT 35

3.1.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO 38

3.1.3. PROCEDIMIENTO DEL EQUIPO PARA LA OBTENCIÓN DE LA VISCOSIDAD 40

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS **43**

3.2.1. ESPECIFICACIÓN DEL "CRUDO 1" 43

3.2.2. ESPECIFICACIÓN DEL "CRUDO 2" 44

3.3. ESPECIFICACIONES DEL DEMULSIFICANTE **44**

3.4. ESQUEMATIZACIÓN DE LOS CRUDOS **48**

3.4.1. ESQUEMATIZACIÓN DEL "CRUDO 1" 48

3.4.2. ESQUEMATIZACIÓN DEL "CRUDO 2" 48

3.5. MATERIALES Y EQUIPOS **49**

3.6. MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS **50**

3.6.1. PREPARACIÓN DE LOS CRUDOS 50

3.6.2. PREPARACIÓN DE LAS EMULSIONES 52

CAPITULO IV **54**

ANÁLISIS Y RESULTADOS **54**

4.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS **54**

4.2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 10% DE DEMULSIFICANTE 57

4.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 15% DE DEMULSIFICANTE 59

4.4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 30% DE DEMULSIFICANTE 62

4.5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 45% DE DEMULSIFICANTE 65

4.6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS 68

4.7. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 10% DE DEMULSIFICANTE 70

4.8. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CRUDO 2 A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 15% DE DEMULSIFICANTE 73

4.9. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 30% DE DEMULSIFICANTE 76

4.10. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 45% DE DEMULSIFICANTE 79

4.11. ANÁLISIS GENERAL DEL "CRUDO 1" 82

4.12. ANÁLISIS GENERAL DEL "CRUDO 2" 85

CAPITULO V 92

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 92

5.1. CONCLUSIONES 92

5.2. RECOMENDACIONES 93

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 94

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1: PLACAS PARALELAS DE UN FLUIDO BAJO UN ESFUERZO DE CORTE..... 17

FIG. 2: ESTRUCTURA DE UNA EMULSIÓN ACEITE EN AGUA. 20

FIG. 3: REPRESENTACIÓN DE TIPOS DE EMULSIONES (A). O/W; (B). W/O; (C). W/O/W. 21

FIG. 4: COMPORTAMIENTO ISOBÁRICO DE LA VISCOSIDAD PARA EL H_2S 29

FIG. 5: CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS. 29

FIG. 6: FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS. 30

FIG. 7: FLUIDO NEWTONIANO 31

FIG. 8: FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO..... 32

FIG. 9: VISCOSÍMETRO SAYBOLT DEMOSTRANDO LOS DOS TIPOS DE ORIFICIOS..... 37

FIG. 10: VISCOSÍMETRO SAYBOLT 38

FIG. 11: VISCOSÍMETRO LISTO PARA REALIZAR LAS RESPECTIVAS PRUEBAS 42

FIG. 12: ESQUEMA DE LA CARACTERIZACIÓN DEL "CRUDO 1"..... 43

FIG. 13: ESQUEMA DE LA CARACTERIZACIÓN DEL "CRUDO 2" 44

FIG. 14: DEMULSIFICANTE SR-1123, DESALTING EMULSION BREAKER 47

FIG. 15: ESQUEMATIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 1" 48

FIG. 16: ESQUEMATIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL "CRUDO 2" 49

FIG. 17: PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE CRUDO 52

FIG. 18: PREPARACIÓN DE LA EMULSIÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE ADITIVO..... 53

FIG. 19: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" SIN DEMULSIFICANTE 56

FIG. 20: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" CON 10% DE DEMULSIFICANTE 59

FIG. 21: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" CON 15% DE DEMULSIFICANTE 62

FIG. 22: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" CON 30% DE DEMULSIFICANTE 65

FIG. 23: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" CON 45% DE DEMULSIFICANTE 67
FIG. 24: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" SIN DEMULSIFICANTE. 70
FIG. 25: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" CON 10% DE DEMULSIFICANTE 73
FIG. 26: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" CON 15% DE DEMULSIFICANTE 76
FIG. 27: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" CON 30% DE DEMULSIFICANTE 79
FIG. 28: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" CON 45% DE DEMULSIFICANTE 82
FIG. 29: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" 84
FIG. 30: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 2" 87
FIG. 31: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS TEMPERATURA DEL "CRUDO 1" Y DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES CONDICIONES..... 88
FIG. 32: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS PORCENTAJE DE DEMULSIFICANTE DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES CONDICIONES..... 89
FIG. 33: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS PORCENTAJE DE DEMULSIFICANTE DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES CONDICIONES..... 90
FIG. 34: CURVA DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA VS PORCENTAJE DE DEMULSIFICANTE DEL "CRUDO 1" Y DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES CONDICIONES..... 91

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DEL CRUDO SEGÚN LA DENSIDAD 13

TABLA 2: CLASIFICACIÓN DEL CRUDO SEGÚN EL CONTENIDO DE AZUFRE 14

TABLA 3: CLASIFICACIÓN DEL CRUDO SEGÚN EL FACTOR KUOP 15

TABLA 4: CONSTANTES A Y B PARA VISCOSIDADES 36

TABLA 5: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS 56

TABLA 6: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 10% DE DEMULSIFICANTE 58

TABLA 7: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 1"A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 15% DE DEMULSIFICANTE 61

TABLA 8: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 30% DE DEMULSIFICANTE 64

TABLA 9: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 45% DE DEMULSIFICANTE 67

TABLA 10: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS 69

TABLA 11: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 10% DE DEMULSIFICANTE 72

TABLA 12: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 15% DE DEMULSIFICANTE 75

TABLA 13: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 30% DE DEMULSIFICANTE 78

TABLA 14: TABULACIÓN DE DATOS DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES TEMPERATURAS CON 45% DE DEMULSIFICANTE 81

TABLA 15: ANÁLISIS EXPERIMENTAL GENERAL DEL "CRUDO 1" A DIFERENTES CONDICIONES 83

TABLA 16: ANÁLISIS EXPERIMENTAL GENERAL DEL "CRUDO 2" A DIFERENTES CONDICIONES 86

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

"REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA EN EMULSIONES DE CRUDOS PESADOS"

Autora: Lissette Estefanía López Santillán
Tutor: Ing. Francisco Javier Montalván Tóala, MSc.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el estudio del comportamiento de dos crudos pesados procedentes de diferentes campos del Oriente Ecuatoriano, uno proveniente del campo AMO y el otro proveniente del campo YURALPA los cuales tienen 16° y 17° API respectivamente, que por su condición de crudos pesados tienden a tener una alta viscosidad a temperatura ambiente. Los comportamientos se analizaron mediante pruebas de laboratorio utilizando un viscosímetro Saybolt, con el cual se pueden obtener mediciones de viscosidad cinemática en un amplio rango de temperatura a las que se van a someter los crudos y adicional se dosificó un porcentaje de demulsificante. Al observar los resultados se apreció el decrecimiento considerable en su viscosidad, lo cual es favorable ya que se puede transportar por medio de tuberías de manera más efectiva. Considerando que la viscosidad del crudo pesado es muy alta, estas pruebas de laboratorio permitieron determinar la temperatura y el porcentaje de aditivo óptimo para cada tipo de crudo. La conclusión más relevante, derivada del análisis de dos crudos pesados, sin adición de un solvente y con la mezcla crudo/solvente: La variación de temperatura y aditivo logró reducciones de viscosidad hasta de 107 cst a una temperatura de 60 °C y un 15% de demulsificante. Esto demuestra que la viscosidad de los crudos va a disminuir mientras haya un aumento de temperatura, además se observó que al incrementar el porcentaje de aditivo, el valor de viscosidad disminuye notablemente. De igual manera se determinó experimentalmente las curvas de variación de viscosidad en función de la temperatura.

Palabras Claves: viscosidad cinemática, crudos pesados, demulsificante, viscosímetro Saybolt.

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

"GRAPHICAL REPRESENTATION OF THE BEHAVIOR OF THE CINEMATIC VISCOSITY IN HEAVY CRUDE EMULSIONS"

Autora: Lissette Estefanía López Santillán
Tutor: Ing. Francisco Javier Montalván Tóala, MSc.

ABSTRACT

In the present research work, the study of the behavior of two heavy crudes from different fields of the Ecuadorian East, one from the AMO field and the other from the YURALPA field, which have 16 ° and 17 ° API respectively, was carried out. The condition of heavy crudes tend to have a high viscosity at room temperature. The behaviors were analyzed by means of laboratory tests using a Saybolt viscometer, with which kinematic viscosity measurements can be obtained over a wide range of temperatures at which the crude oils are going to be subjected and additionally the percentage of demulsifier was dosed. When observing the results, the considerable decrease in its viscosity was appreciated, which is favorable since it can be transported by means of pipes more effectively. Considering that the viscosity of the heavy oil is very high, these laboratory tests allowed to determine the temperature and the percentage of optimum additive for each type of crude oil. The most relevant conclusion, derived from the analysis of two heavy crudes, without the addition of a solvent and with the crude / solvent mixture: The variation of temperature and additive achieved viscosity reductions of up to 107cst at a temperature of 60 ° C and a 15 % of demulsifier. This shows that the viscosity of the crudes will decrease while there is an increase in temperature; furthermore, it was observed that by increasing the additive percentage, the viscosity value decreases markedly. In the same way, the viscosity variation curves were determined experimentally as a function of temperature.

Key words: kinematic viscosity, heavy crude, demulsifier, Saybolt viscometer.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general analizar el comportamiento de un crudo pesado con respecto a la variación de la temperatura y del porcentaje de demulsificante, el efecto que causará al dosificar el crudo y la utilización de un viscosímetro Saybolt darán como resultado la disminución de la viscosidad cinemática.

Para el cumplimiento de los objetivos descritos se realizaron pruebas de laboratorio y se estructuró el proceso de investigación en cinco (5) capítulos.

En el capítulo 1, referido al planteamiento del problema, en él se describe el tema de estudio, especifica la metodología de investigación, plantea la problemática, formulan los objetivos y justifica el estudio.

El capítulo 2 comprende los fundamentos teóricos del crudo pesado, su composición química y propiedades físicas, también da a conocer el concepto de emulsiones, sus propiedades físicas y caracterización. Además de las clases de viscosidades y la clasificación de los tipos de fluidos.

En el capítulo 3 se caracterizan los materiales y métodos que se usaron para este estudio, se describe el equipo que fue empleado para las pruebas de laboratorio (viscosímetro Saybolt), su forma de calibración y el procedimiento a seguir para su manipulación, así como los dos tipos de crudos que se usaron para este proyecto de investigación y el aditivo (demulsificante) que se empleó para preparar la emulsión. Se puntualiza el proceso a seguir para el análisis y preparación de las muestras.

En el capítulo 4, se realiza el análisis de los resultados que se obtuvieron a través las pruebas de laboratorio, de igual manera se efectúa el respectivo estudio experimental de los dos tipos de crudo (16° y 17° API) con y sin dosificación de demulsificante variando su porcentaje de aditivo y la temperatura. Como resultado se obtuvieron curvas de viscosidades de cada crudo con sus debidas condiciones físicas, es decir, gráficas de viscosidad vs temperatura para el crudo, para el petróleo con emulsión la gráfica es la misma pero con mezcla de crudo/solvente como dato adicional. También se grafica la parte de viscosidad cinemática vs porcentaje de demulsificante.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones con respecto a los objetivos planteados, de igual manera se definen las recomendaciones respectivas derivadas de las conclusiones.

CAPÍTULO I

1.1. Descripción del Tema

En la actualidad, debido a la alta extracción de las reservas de crudo liviano en el mundo, el interés de las compañías petroleras se ha enfocado en mejorar nuevas tecnologías aplicadas a la producción de crudos cada vez más viscosos sin alterar o dañar el medio ambiente. Por lo que se han hecho diversos estudios para así poder establecer cuál sería el mejor método de explotación, implicando bajos costos de operación, ya que hasta el momento el petróleo es la menos costosa y principal fuente de energía utilizada en el mundo.

Existen varios métodos de recuperación de hidrocarburos y una de las alternativas para mejorar la viscosidad de los crudos pesados es el uso de emulsiones, que alteran sus propiedades físicas y por ende se facilita su extracción y transporte. Sin embargo, para conocer el porcentaje óptimo de concentración de aditivos utilizados para cada tipo de crudo, es necesario realizar varios análisis de laboratorio y con los resultados obtenidos se podrá determinar la dosificación apropiada que permita obtener un mayor factor de recuperación.

Se conoce que la viscosidad es una propiedad muy significativa al momento de determinar un método de producción apropiado o al hablar del transporte de crudos pesados, ya que este parámetro establece que tan fácil fluirá a través del yacimiento. Sin embargo, debido a varios estudios, se puede analizar el comportamiento de la viscosidad de un crudo pesado a diferentes

condiciones físicas, tales como: la variación de la temperatura y el porcentaje de demulsificante, utilizando el viscosímetro como equipo eficiente para tal fin.

Existen varios tipos de viscosímetros útiles para un estudio de viscosidad, sin embargo para este proyecto se utilizó un viscosímetro Saybolt ya que permitió observar la variación de la viscosidad cinemática a temperaturas variables y no constantes, lo que facilitó una mejor apreciación del comportamiento de estos crudos, dando posibles valores de temperaturas, viscosidades y porcentajes de aditivos con resultados favorables para poder mejorar el transporte de un crudo pesado, antes de pasar por el proceso de separación, posibilitando la mejora en la producción de crudos pesados.

Para el desarrollo de la investigación se estableció como objetivo estudiar el comportamiento de crudos pesados a diferentes condiciones físicas, mediante pruebas de laboratorio para optimizar la viscosidad cinemática con respecto al porcentaje de demulsificante y a la variación de la temperatura. Además se realizó la descripción detallada del procedimiento a seguir para estos análisis, dándose a conocer los materiales y equipos empleados.

1.2. Planteamiento del Problema

Las técnicas de extracción de petróleo en los últimos años han evolucionado de una manera impresionante, al punto que en la actualidad es rentable la producción de yacimientos de crudos pesados y extra pesados, cuyas densidades varían entre 8° y 20° API. Estos tipos de crudos establecen un gran desafío a la industria petrolera por sus altas viscosidades, propiedad

importante en la que se enfoca una compañía petrolera para mejorar su producción, además afecta de manera representativa los gastos de transporte desde los campos de extracción y producción hasta las diferentes refinerías o plantas petroquímicas.

Lo planteado anteriormente constituye una problemática para extraer crudos pesados, ya que para ello se hace necesario el uso de técnicas innovadoras y también demanda mayor inversión de dinero. Sin embargo, en la actualidad estos yacimientos pueden ser explotados de manera rentable si se recurre al estudio de diferentes métodos para modificar el comportamiento de la viscosidad del crudo, algunos de estos métodos son los realizados por calentamiento, dilución, inyección de CO_2 y elaboración de emulsiones.

Derivado de lo antes expuesto, se desprende el estudio de investigación, donde se demuestra, por medio de pruebas de laboratorio, como varían las condiciones del crudo sometido a temperaturas específicas y a diferentes porcentajes de demulsificante, evaluando el porcentaje óptimo de concentración para los diferentes tipos de crudos. En este caso, para este estudio se eligieron dos tipos de crudos pesados: 16° y 17° API.

En el marco del trabajo de investigación, es importante conocer el comportamiento de la viscosidad de un crudo en un yacimiento, porque de esta forma se obtiene el punto óptimo de producción al definir el porcentaje adecuado para que el método de recuperación sea rentable. Con este estudio se obtiene información que puede contribuir a mejorar la viscosidad de un crudo pesado mediante la adición de una emulsión más la variación de la temperatura, logrando disminuir los valores de viscosidad cinemática, lo que

es conveniente para la movilidad del crudo y en consecuencia para la compañía petrolera.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Estudiar el comportamiento de crudos pesados a diferentes condiciones físicas, mediante pruebas de laboratorio para optimizar la viscosidad cinemática con respecto al porcentaje de demulsificante y a la variación de la temperatura.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la viscosidad cinemática de los crudos pesados por medio del viscosímetro Saybolt para conocer su comportamiento respecto a la temperatura.
- Dosificar los crudos pesados con diferentes porcentajes de demulsificante para disminuir su viscosidad optimizando la recuperación del crudo.
- Conocer la viscosidad cinemática apropiada variando la temperatura y el porcentaje de demulsificante que mejoraría la recuperación de crudos pesados.

1.4. Justificación

Para las industrias petroleras es muy importante el estudio del comportamiento de fluidos en un yacimiento, por ello se realizan pruebas para la obtención de valores exactos de viscosidad, y es la precisión del viscosímetro Saybolt al momento de obtener los datos requeridos, lo que se constituye en la razón de su uso para este estudio.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad optimizar la viscosidad cinemática de dos tipos de crudos pesados de 16° y 17° API, en función de dos parámetros físicos, incrementando considerablemente la temperatura del crudo y variando el porcentaje de demulsificante con que se va a dosificar al crudo, antes de colocar la muestra dentro del viscosímetro.

Derivado de la optimización de la viscosidad, se busca mejorar el transporte de un crudo pesado, lo que podría reducir costos en la extracción y producción, obteniendo una mejor visualización para la toma de decisiones logrando mayor rentabilidad para la empresa petrolera.

1.5. Metodología

La metodología aplicada en este trabajo de investigación permite obtener parámetros físicos y la caracterización necesaria de los crudos y aditivos adquiridos para su respectivo estudio y análisis, siendo estas técnicas aceptadas dentro de las normas ASTM a la que se ajusta el equipo utilizado en este proyecto.

Se desarrollaron pruebas de laboratorio necesarias para cada muestra de crudo, siendo útil la tabulación de los resultados para su respectivo análisis; además de realizar el cálculo matemático y la gráfica correspondiente a cada tabla, con el objetivo de obtener una línea base para la correcta interpretación de resultados permitiendo establecer un perfil rentable y satisfactorio de producción en crudos pesados.

Tipo y diseño de la Investigación

El análisis que se llevó a cabo con dos muestras de crudo pesado, cuya caracterización se realizó mediante la utilización de normas ASTM. (American Society of Testing and Materials) respectivamente y pruebas de laboratorio para la obtención de los resultados a través del uso del viscosímetro Saybolt.

Los tipos de investigación a aplicarse son:

Investigación descriptiva.

Esta investigación se basa en la descripción y el orden de datos importantes recolectados durante el proceso de estudio. Consistió en la ejecución de pruebas de laboratorio, preparando emulsiones con dos muestras de crudo pesado con densidades de: 16° y 17° API respectivamente y con porcentajes de: 10%, 15%, 30% y 45% de demulsificante, analizando su respectivo comportamiento a las temperaturas de: 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100°C.

Investigación bibliográfica.

En este apartado se realizó la recopilación de trabajos realizados con temas relacionados a la presente investigación, construyéndose una base sólida para su desarrollo.

De igual manera, la bibliografía analizada versó sobre el estudio del comportamiento de un crudo pesado con respecto a su viscosidad, temperatura y porcentaje de demulsificante para un perfil de producción rentable. Por otro lado, se realizó el análisis a las pruebas de laboratorio obtenidas del viscosímetro Saybolt, para su posterior tabulación e interpretación de las gráficas de viscosidad vs temperatura.

Investigación Experimental.

El presente trabajo se ejecutó en el laboratorio petrofísico de la ESPOL, contribuyendo a la obtención de resultados con el empleó de un viscosímetro Saybolt y dos muestras de crudos pesados de 16 y 17° API, respectivamente. Cumpliendo con las normas de seguridad establecidas por el laboratorio se pudieron realizar las pruebas petrofísicas de las mezclas preparadas para su respectivo análisis experimental y analítico.

Técnicas

- Recopilación de datos.
- Procesamiento de datos.
- Revisión bibliográfica.
- Obtención de muestras de crudos pesados.
- Elaboración de pruebas de laboratorio.

Instrumentos

- Libros.
- Manuales.
- Internet.
- Laboratorio Petrofísico.
- Viscosímetro Saybolt

Método Sintético

Este método consiste en la recopilación de elementos dispersos convirtiéndolos en una totalidad.

Recopilando toda la información obtenida de las pruebas de laboratorio se pueden demostrar la mejor efectividad con respecto al porcentaje de demulsificante que debe ser utilizado para una emulsión y contribuir con la toma de decisiones referidas al transporte de un crudo pesado.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Generalidades de los Crudos Pesados

2.1.1 Definición de crudos pesados

El petróleo está conformado por una serie de multicomponentes constituidos por enlaces covalentes entre átomos de carbono e hidrógeno, también aparecen otros compuestos formados con azufre, metales, entre otras sustancias. El crudo pesado con respecto al crudo liviano es más caro de producir, pero en la actualidad la demanda de energía a nivel mundial ha convertido al crudo pesado en un recurso factible. (Calle, 2004).

La viscosidad de un crudo es un parámetro muy importante al momento de tasar su valor económico, rendimiento y costos de refinación, esta propiedad es el factor de mayor afectación con respecto a la producción, recuperación y transporte. Se puede decir que mientras más viscoso sea un crudo va tener menor movilidad y por ende será más difícil su extracción, esta medida determina la facilidad que tiene un yacimiento para producir.

En ese sentido, el Congreso Mundial del Petróleo indica que un crudo pesado, es aquel que tiene una densidad menor a 22,3° API, baja relación de hidrógeno-carbono, además del alto contenido de asfaltenos y metales pesados. Uno de los procesos para la formación de crudos pesados es la biodegradación de hidrocarburos livianos, ya que genera metano e hidrocarburos pesados.

Existen otros mecanismos para la formación de este crudo como son el arrastre por agua y el fraccionamiento de fases, estos procesos separan las fracciones livianas por medios físicos y biológicos. (Cruz, 2010).

2.1.2 Tipificación de Crudos

A través del tiempo han surgido varios criterios para clasificar a los crudos, que intentan dar una idea de su composición, esto es debido a los variados elementos presentes en este producto. Dicha clasificación se vincula estrechamente con el índice de grados API o Gravedad específica, denominándolos como livianos, medianos, pesados y extra pesados. (Gonzáles, 1980).

El petróleo se compone de diversos elementos químicos (orgánicos e inorgánicos) que lo caracterizan por su color, viscosidad, densidad, entre otras; y para la valoración con respecto a procesos de refinación se necesita una descripción completa del crudo, sus componentes y propiedades. Considerando los aspectos mencionados se puede clasificar al crudo tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Densidad.
- Presencia de azufre.
- Composición química: depende de la presencia de ciertos componentes químicos en el petróleo, dándole a éste una característica particular y clasificándolo a su vez en: Parafínicos, Nafténicos y Mixtos.

Es muy importante para el refinador conocer todos los compuestos que constituyen al petróleo crudo. Estas características se pueden determinar con procesos simples y económicos. (Sociedad Nacional de mineria petroleo y energia, 2007).

2.1.2.1 Gravedad API

La gravedad API está establecida por la comparación de la densidad del petróleo y la densidad del agua, es decir se busca conocer si el petróleo es más pesado o liviano que el agua. Esta propiedad indica que tan liviano o pesado es un crudo en su totalidad. El Instituto de Petróleo Americano indica que a mayor gravedad API, el crudo tiende a ser más liviano. Como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Clasificación del crudo según la Densidad.

Tipo de petróleo	Densidad (g/cm^3)	Gravedad API
Extra pesado	> 1.0	< 10
Pesado	1.0-0.92	10-22.3
Mediano	0.92-0.87	22.3-31.1
Liviano	0.87-0.83	31.1-39
Superliviano	< 0.83	> 39

Fuente: (Barrios, 2011)
Elaboración: (López, 2018)

En el mercado petrolero la demanda de crudos livianos es la más solicitada, además sus costos de extracción y refinación son menores a los de un crudo pesado. Con esto se infiere que un crudo liviano es de mayor calidad en comparación a un crudo pesado, debido a que los livianos están compuestos

por un mayor número de moléculas pequeñas, que al refinarse pueden convertirse en gasolinas o diésel a diferencia de un crudo pesado que contiene mayor número de moléculas grandes que si se refinan se pueden usar como asfaltos y combustibles industriales pesados. (MathPro, 2011).

2.1.2.2 Contenido de Azufre

Uno de los compuestos que más afecta a un proceso de refinación es el azufre en el crudo, las concentraciones altas de azufre pueden contaminar los catalizadores en una reacción química, provocando corrosión en los equipos y emisiones de contaminantes sulfurados al medio ambiente. Los niveles de este compuesto son controlados de manera estricta, ya que si los valores son elevados los costos de procesamiento son mayores. Debido a esto se clasifica el crudo tomando en cuenta el porcentaje de azufre presente en él, tal como se muestra en la tabla 2. (MathPro, 2011).

Tabla 2: Clasificación del crudo según el contenido de Azufre

Tipo de Petróleo	% de Azufre
Dulce	< 0,5
Agrio	> 1

Fuente: (Barrios, 2011)
Elaboración: (López, 2018)

Se establece que el petróleo se clasifica en dos formas:

- Petróleo Dulce: es un crudo de alta calidad
- Petróleo Agrio: su costo de refinación es mayor

2.1.2.3 Composición Química

Para saber la composición química del petróleo se utiliza un método empírico que fue propuesto por Watson, en este método se determina un factor de correlación o factor Kuop, se utiliza un concepto equivalente al punto de ebullición debido a que no conforman componentes puros, este concepto equivalente es el MeABP *(mean average boiling points)* (Lluch, 2008), la siguiente relación define el factor Kuop:

$$Kuop = \frac{(MeABP)^{\frac{1}{3}}}{\rho_r^{\frac{60°F}{60°F}}} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_r^{\frac{60°F}{60°F}}$, es la densidad relativa del crudo o su fracción a 60ºF.

Para este caso según el valor Kuop, será la base del crudo, teniendo la clasificación mostrada en la tabla 3.

Tabla 3: Clasificación del crudo según el factor Kuop

Tipo de Petróleo	Factor Kuop
Parafínicos	13
Mixtos	12
Nafténicos	11
Aromáticos	10

Fuente: (Lluch, 2008)
Elaboración: (López, 2018)

2.1.3 Propiedades Físicas de los Crudos Pesados

El petróleo es una mezcla de elementos orgánicos con estructuras variadas y distintos pesos moleculares, es importante conocer las propiedades físicas de un crudo para poder caracterizarlo y así seguir con su respectivo proceso. Las propiedades a considerar para caracterizar al crudo son las siguientes: peso específico, gravedad API, punto de ebullición, color, olor, viscosidad, poder calorífico, punto de inflamación, solubilidad y ciertas constantes críticas, que darán la característica propia a un crudo y permitirá evaluar a un yacimiento con respecto a su rendimiento. Esta evaluación se debe realizar en condiciones estáticas y dinámicas en el yacimiento y también en la superficie. (Limón, 2014).

2.1.3.1 Viscosidad del Crudo

La viscosidad de un fluido está relacionada con la resistencia ejercida, que surge a partir de la falta de movilidad de un fluido (Heidemann et al., 1987). Para una mejor comprensión de esta propiedad, se tiene un fluido entre dos placas paralelas de área (A) y con una distancia (h) entre ambas.

Tomando en cuenta un tiempo $(t = 0)$, una fuerza (F) ejercida a la placa superior y un esfuerzo cortante $\tau = \frac{F}{A}$ ejercido en el fluido, con una velocidad constante (U) como lo indica la figura 1.

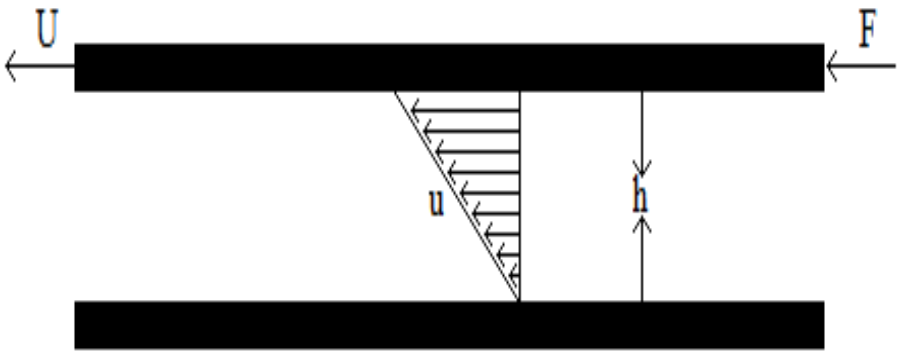

Fig. 1: Placas paralelas de un fluido bajo un esfuerzo de corte.
Fuente: (Castillo, 2014).

La parte del fluido que tiene contacto con la placa superior tendrá una velocidad (U), mientras que la parte inferior del fluido que está en contacto con la placa inferior, va a tener una velocidad de cero. La velocidad a una distancia dada y desde la placa inferior está dada por:

$$u(y) = U\left(\frac{y}{h}\right) \qquad (2)$$

Entonces, para muchos fluidos la fuerza (F) requerida para mantener el movimiento de la placa superior es directamente proporcional al área (A) y a la velocidad (U), e inversamente proporcional al espesor (h), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta\frac{U}{h} \qquad (3)$$

Donde η es la viscosidad dinámica. Asumiendo que el flujo de fluidos es laminar sin turbulencia, donde la ecuación 3 puede ser presentada como:

$$\tau = \eta\frac{du}{dy} \qquad (4)$$

La ecuación 4 es la ley de Newton para la viscosidad donde $\frac{du}{dy}$ es el gradiente local de velocidad ortogonal a la dirección de flujo o el esfuerzo cortante γ. (Heidemann et al., 1987).

2.1.3.2 Coloración del crudo

El color del petróleo va a ir variando dependiendo de su peso específico, si se tiene un crudo liviano la coloración que va a tomar será amarillo, en un crudo mediano se tornara de un color ámbar y para un crudo pesado será de color oscuro. Se conoce que los hidrocarburos puros son incoloros pero se colorean al momento en que se oxidan en especial los crudos no saturados, por ende la coloración que tomen va a depender de la estructura molecular de cada petróleo obtenido.

2.1.3.3 Olor del crudo

Este parámetro dependerá de la composición del crudo que se esté obteniendo, por ejemplo si se tiene un hidrocarburo no saturado el olor de este será desagradable debido a los altos contenido de azufre que contiene, en cambio un petróleo crudo tendrá un olor aromático. Por lo general esta propiedad varía de acuerdo a la cantidad de impurezas que tenga el petróleo.

2.1.3.4 Solubilidad del crudo

Los crudos son solubles entre sí a cualquier proporción pero son insolubles en agua, debido a esto son peligrosos cuando se provocan derrames en mares o incendios en tanques de almacenamientos. Por lo general también son solubles en benceno, éter entre otros solventes orgánicos.

2.2 Conceptos Generales de Emulsiones

2.2.1 Definición

Las emulsiones son sistemas heterogéneos, una emulsión es la mezcla de dos líquidos inmiscibles, es decir, líquidos que no se mezclan y cuando esto ocurre, uno de estos líquidos se dispersa en el otro en forma de pequeñas gotas, siendo estabilizado por un agente emulsionante (Anguiano, 2009).

Existen dos fases en este sistema, la primera llamada fase dispersa o interna y la segunda como dispersante, continúa o externa (IUPAC, 2012). Debemos considerar que cada fase tiene diferente solubilidad, la fase hidrófila la cual es soluble en agua y lipófila o hidrófoba, la cual no es soluble en agua (Morales, 2014).

Casi siempre una emulsión se forma por la presencia de uno o varios aditivos y agentes emulsionantes que cumplen la función de disminuir la energía superficial en la interfase de las gotas que se han producido. Estas sustancias poseen moléculas polares y no polares, dando la posibilidad de disolución,

tanto en agua como en disolventes orgánicos y aceites, tal como se muestra en la figura 2 (Fernandéz, 2006).

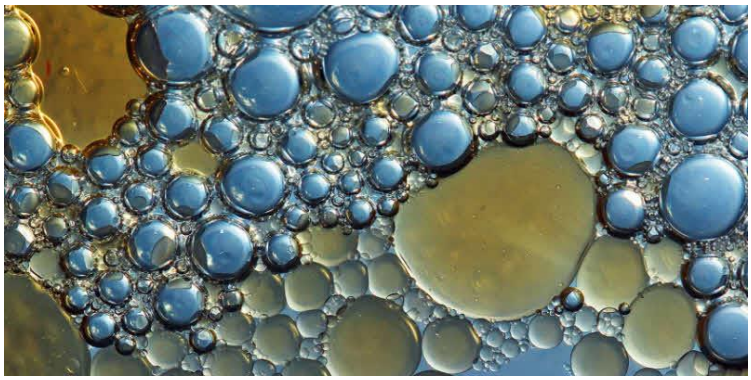

Fig. 2: Estructura de una Emulsión Aceite en agua.
Fuente: (Morales, 2014)

2.2.2 Clasificación de las Emulsiones

Las emulsiones se pueden clasificar por varios criterios.

2.2.2.1 Por la composición de las fases que la forman

Para Martínez (2010), según la naturaleza de sus fases, una emulsión se va a clasificar de la siguiente manera, como lo muestra la figura 3:

- Emulsiones agua en aceite (W/O); cuando la fase dispersa está formada por el agua (W) y la fase continua por el aceite (O).
- Emulsiones aceite en agua (O/W); cuando la fase dispersa está formada por el aceite (O) y la fase continua por el agua (W).
- Emulsiones múltiples (W/O/W); cuando la fase dispersa tiene en su interior gotas de la fase continua.

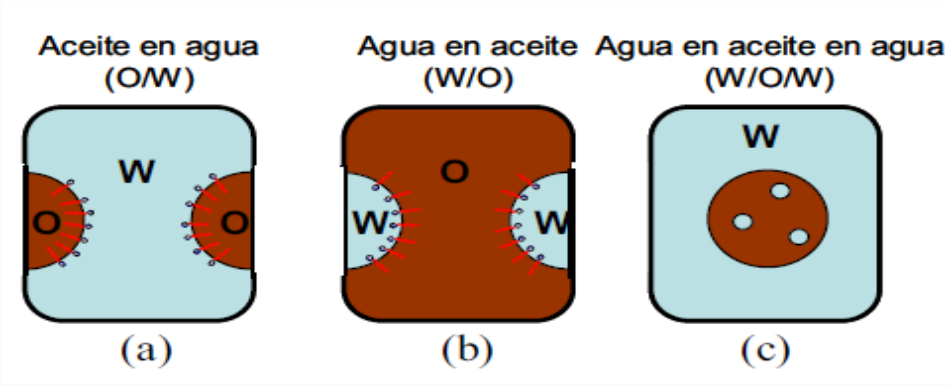

Fig. 3: Representación de tipos de Emulsiones (a). O/W; (b). W/O; (c). W/O/W.
Fuente: (Martínez, 2010)

Por medio de este criterio tenemos dos tipos de emulsiones, las emulsiones directas en la que la fase externa es hidrófila y las emulsiones inversas en la que la fase externa es lipófila.

2.2.2.2 Por el tamaño de sus gotas

Se tiene dos tipos de emulsiones: la primera es cuando las gotas tienen diámetros comprendidos entre 1 y 10μm, son llamadas macro emulsiones, por otra parte cuando las gotas tienen diámetros menores a 1μm son denominadas nano o mini emulsiones (Calle, 2004). La estabilidad de la emulsión se ve influenciada directamente por el tamaño de la gota de la fase interna, así mismo por la distribución media de estas en el seno de la fase externa; entre menor sea el tamaño de la gota de la fase interna, menor será la viscosidad de la mezcla para la misma concentración de fase interna (Morales, 2014).

2.2.3 Propiedades Físicas de las Emulsiones

Se debe conocer que las emulsiones que más interesan a las industrias petroleras son las Oleo acuosas (aceite y agua), estas son sustancias que van a depender de su aspecto físico y su utilidad, teniendo como parámetros más importantes: la viscosidad, facilidad de dilución, color, estabilidad y facilidad de formación.

Con base a lo descrito, se definen las propiedades de las emulsiones de la forma siguiente:

- Constituyen dispersiones de un líquido dentro de otro, pero en forma de gotas
- Son sistemas muy inestables, con cierto porcentaje de estabilidad cinética.
- La mayoría de las emulsiones no son transparentes.

Por ser inestables las emulsiones tienden a separar sus fases completamente, un método para conocer la naturaleza de una emulsión es verificando su miscibilidad con disolventes acuosos y apolares. (Fernandéz, 2006).

2.2.4 Aplicaciones de las Emulsiones

Se han realizado varias aplicaciones de emulsiones para transportar el crudo pesado, como es el caso de la Orimulsión, la cual fue implementada por la petrolera estatal de Venezuela PDVSA en la década de los ochenta. Esta consiste en una emulsión de bitumen en agua, que se desarrolló con el objetivo de mejorar el transporte del crudo y era más económico que el gasoil

convencional utilizado en esa época. La Orimulsión era más sencilla de transportar y a su vez podía ser usada como materia prima para la generación de calor en las centrales termoeléctricas (Martínez et al., 2011).

Las emulsiones son aprovechadas tanto para la mejora, disminución de precios y el desarrollo de métodos convencionales. Además, era muy necesario la adición de agentes humectantes y espesantes así como también la adición de agentes que impidan una degradación química.

2.2.5 Caracterización de Emulsiones

Las características de una emulsión dependen de su composición y de su preparación. A continuación se dan sus principales características:

- Conductividad, la cual depende de la naturaleza de la fase continua o externa, ya que esta fase va a transportar las cargas.
- Tensión interfacial, es la fuerza requerida para romper la superficie entre los líquidos no miscibles; mientras la tensión interfacial entre las dos fases de una emulsión sea baja, más fácil será la emulsificación.
- Solubilidad de una emulsión, se determina por la fase continua, si la emulsión puede ser diluida en agua, entonces la fase continua es hidrosoluble, si se puede diluir en aceite entonces es oleo soluble.
- Distribución y tamaño de las gotas, son regidos por la eficacia y la cantidad del demulsificante, el orden de la mezcla y la agitación que se haga a esta. Gotas de menor tamaño a 10 μm, generalmente producen emulsiones más estables. Una amplia distribución de tamaños de gotas generalmente producen una emulsión menos estable. Existe mayor

viscosidad cuando es menor el tamaño de las gotas. Y hay menor viscosidad cuando es más amplia la distribución de tamaño de las gotas (Rebolledo and Melania, 2007).

2.2.6 Estabilidad de las Emulsiones

La estabilidad de las emulsiones depende de varios factores, uno de estos es la presencia de varios compuestos con actividad de superficie en el petróleo, como son los agregados por ácidos nafténicos y asfaltenos (Sjöblom et al., 2003). Otro factor es el pH del agua y la salinidad; así como el tipo de tenso activo, concentración y presencia de alómeros (Porter, 1994). Los tenso activos deben permitir el rompimiento de la emulsión de una manera sencilla y la recuperación crudo-anhidro, además del tratamiento de agua. Los tenso activos no iónicos son una buena opción, ya que no se ven afectados por la salinidad del agua, son relativamente económicos y no producen residuos orgánicos indeseables que afecten las propiedades del crudo. (Rivas et al., 1998).

El Proceso de emulsificación se puede generar por dos etapas: La etapa de transporte del tensioactivo a la interface, muy dependiente del número de Reynolds y también se tiene la etapa de generación de interfaces, donde predomina el número Capilar y es importante conocer la energía que se proporciona al sistema. La utilización de un emulsionante adecuado en la interface permitirá mantener la estabilidad de una emulsión ya que tendrá la capacidad de crear una barrera protectora que dificultará la coalescencia.

Se conoce que las emulsiones son termodinámicamente inestables, por eso es importante estudiar su estabilidad cinética junto con los mecanismos de desestabilización que se puedan ocasionar. Existen dos métodos que pueden estabilizar una emulsión, estos son: la estabilización electrostática y la estabilización estérica. En el primer método, la fuerza que contrarresta Van der Waals (interacción de fuerza) es la repulsión de Coulomb entre una superficie cargada electrostáticamente. En cambio en el segundo método, la estabilización se da por repulsiones estéricas que se relacionan a exclusiones de volumen. (Martínez, 2010).

2.3 Fundamentos Teóricos de la Viscosidad de los Fluidos

2.3.1 Definiciones de viscosidad

La viscosidad es una propiedad termofísica de transporte de los fluidos muy importante para la determinación de los procesos industriales que se vayan a realizar para la producción de petróleo. A este parámetro se lo describe como la medida del movimiento relativo de un fluido que se resiste a la deformación que es originado por la fricción interna del mismo, sin valerse de las leyes de rozamiento entre sólidos.

Cuando un fluido tiende a fluir puede hacerlo de forma laminar o turbulento. Las unidades de medida de la viscosidad en el sistema internacional (SI) es el Pascal, mientras que en el sistema CGS es el Poise (p). (Zambrano, 2014).

2.3.1.1 Viscosidad Dinámica

Es una propiedad de los fluidos que se caracteriza por su resistencia a fluir, esto es debido al rozamiento entre sus moléculas (Mardones and Juanto, 2014). La unidad fundamental en el sistema C.G.S. es el poise, definido como $\text{poise} = \frac{\text{dina·segundo}}{\text{cm}^2}$, en la práctica se utiliza el centipoise, que es la centésima parte de un poise.

Se define como:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial u}{\partial y}} \tag{5}$$

Donde τ es la tensión tangencial y Y es la dirección normal al movimiento.
Esta viscosidad es una constante de proporcionalidad, definida como la razón entre el esfuerzo cortante y gradiente de velocidad, que determina el grado de fluidez de una sustancia. (Zambrano, 2014).

2.3.1.2 Viscosidad Cinemática

La viscosidad cinemática es definida como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad (Mardones and Juanto, 2014). La unidad fundamental es el stoke, definido como $stoke = \frac{cm^2}{\text{segundo}}$, en la práctica se utiliza en centistoke, que es la centésima parte de un stoke. Por analogía la viscosidad cinemática se refiere al momento de difusividad del fluido. (Zambrano, 2014).

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{6}$$

Donde ρ es la densidad del fluido.

2.3.2 Métodos de medición de la Viscosidad

La viscosidad se mide por métodos experimentales que pueden ser determinados como relativos y absolutos, en base a las definiciones de viscosidad cinemática y dinámica, para que después los resultados obtenidos sean sometidos a un desarrollo matemático. (Zambrano, 2014). Existen varios métodos para medir el coeficiente de viscosidad de líquidos, para fluidos newtonianos se clasifican en 3 grupos, que son:

- Viscosímetro Capilar
- Viscosímetro Caída de bola
- Viscosímetro Rotacional

El viscosímetro de tambor rotatorio, en este caso el fluido tiene contacto con la superficie del tambor, estableciéndose un gradiente de velocidad; la viscosidad del fluido ocasionará un esfuerzo cortante, lo que provocará un torque de arrastre sobre el tambor rotatorio, el sensor de medición detecta el arrastre e indica el valor de viscosidad. (Peña, 2012).

El viscosímetro de tubo capilar, relaciona a la viscosidad con la magnitud de la caída de presión que ocasiona el equipo al pasar por un tubo a cierta velocidad constante y perdiendo energía, este valor de caída se lo mide con un manómetro. (Peña, 2012).

El viscosímetro caída de bola, un cuerpo cae en un fluido por la influencia de la gravedad, este acelerará hasta que su peso quede equilibrado con la fuerza de flotación y la de arrastre viscoso que actúa hacia arriba.

A la velocidad alcanzada en ese tiempo se la denomina “velocidad terminal” y cuando llega a esta velocidad la bola se queda en equilibrio. Con este método se puede obtener el valor de viscosidad dinámica. Existen viscosímetros de este tipo con un tipo de sensor que va a registrar automáticamente la posición de la bola de tal manera que es viable usar un fluido opaco. (Peña, 2012).

2.3.3 Factores que influyen en la Viscosidad

La viscosidad de un fluido puede sufrir cambios si se modifican sus condiciones de temperatura, presión y composición. Mientras el distanciamiento entre las moléculas de un fluido sea mayor, la viscosidad va a ser menor, por ejemplo las moléculas de un fluido en estado gaseoso están más distanciadas que el mismo fluido en estado líquido, por ende la viscosidad del fluido en estado gaseoso va a ser menor que en estado líquido (Castillo, 2014).

Asimismo, la viscosidad de un fluido en su fase gaseosa aumenta a medida de que la temperatura incrementa, esto se produce ya que al aumentar su energía cinética incrementa la probabilidad de colisiones. La viscosidad de la fase líquida decrece a medida que se aumenta la temperatura, por el incremento en la contribución intermolecular de naturaleza repulsiva en relación a las atractivas (Castillo, 2014).

Con relación a la presión, la viscosidad aumenta cuando se incrementa la misma, lo cual se da en la mayoría de los casos, tal como se muestra en la figura 4; el comportamiento de la viscosidad con respecto a la presión es diferente en algunos fluidos, tal es el caso del agua (Zéberg and Claus, 2001).

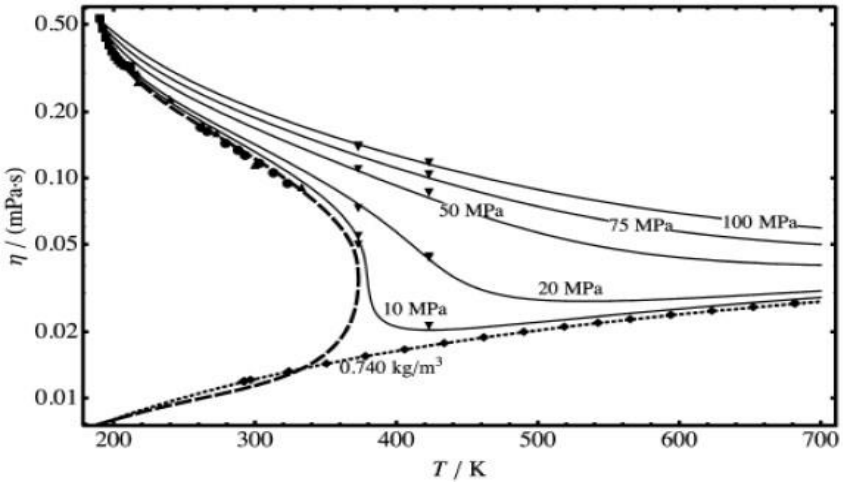

Fig. 4: Comportamiento isobárico de la viscosidad para el H_2S
Fuente: (Castillo, 2014).

2.3.4 Tipos de Fluidos

Los fluidos se clasifican en: newtonianos, no newtonianos y visco elásticos, tal como se muestra en la figura 5.

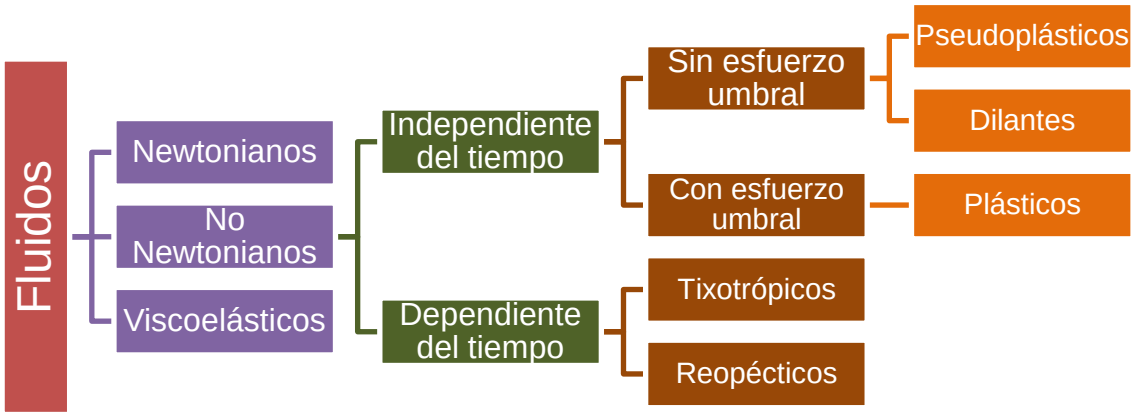

Fig. 5: Clasificación de los fluidos.
Fuente: (Dalmati & Pérez, 2007)

El comportamiento de un fluido newtoniano y no newtoniano se presenta en la figura 6, donde se demuestra la curva del comportamiento newtoniano, mostrando la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

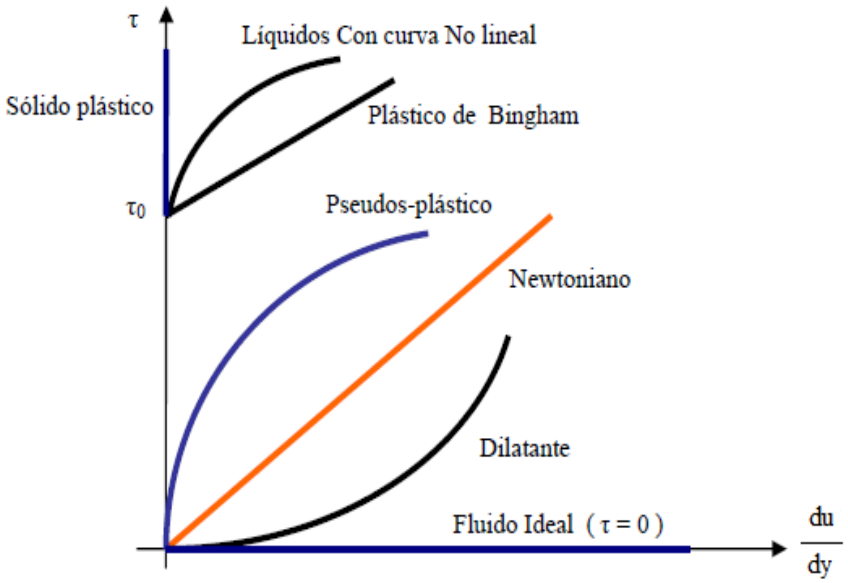

Fig. 6: Fluidos Newtonianos y No Newtonianos.
Fuente: (Dalmati & Pérez, 2007).

2.3.4.1 Fluidos Newtonianos

Cuando la viscosidad es constante para cualquier valor de τ, el fluido es llamado Newtoniano o fluido viscoso lineal, lo que quiere decir que su representación gráfica es una línea recta que pasa por el origen como lo muestra la figura 7. (Rojas et al., 2012).

La viscosidad de un fluido Newtoniano se representa con la letra griega μ.

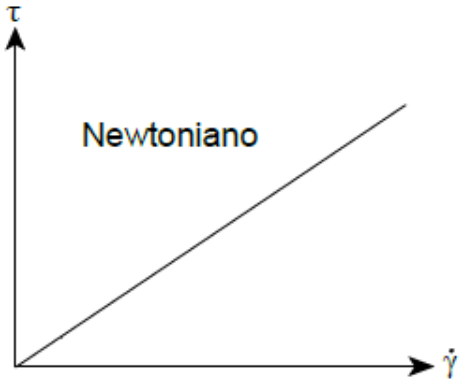

Fig. 7: Fluido Newtoniano
Fuente: (Rojas et al., 2012).

2.3.4.2 Fluidos No Newtonianos

Esos fluidos se clasifican en tres grandes grupos:

- Fluidos independientes del tiempo.

Se los denominan fluidos no newtonianos puramente viscosos y pueden o no tener una tensión inicial τ_o, necesaria para iniciar el movimiento. Son los que mantienen la relación τ y $\frac{du}{dy}$, sin variar con el tiempo la tensión τ (Dalmati & Pérez, 2007). Los modelos más sencillos están los denominados plásticos de Bingham, donde:

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \frac{du}{dy} \tag{7}$$

También se encuentran los fluidos pseudo-plásticos, los cuales poseen la característica de reducir la resistencia a medida que se aumenta el esfuerzo. El modelo más sencillo es la ley de potencia.

$$\tau = \kappa \cdot \left(\frac{du}{dy}\right)^n \tag{8}$$

Donde κ se denomina consistencia y depende de n

Los fluidos pseudo-plásticos tendrán valores de $\mathrm{n} < 1$.

Los fluidos dilatantes aumentan su viscosidad aparente con el esfuerzo de corte ($n > 1$).

- Fluidos dependientes del tiempo

Son fluidos en los que la duración de la aplicación del esfuerzo influye sobre $\tau = \eta \frac{du}{dy}$. Estos fluidos pueden ser tixotrópicos, cuando la tensión de corte disminuye con el tiempo para un valor determinado de $\frac{du}{dy}$, ó reopécticos cuando la tensión aumenta con el tiempo como se muestra en la figura 8 (Dalmati & Pérez, 2007).

En ambos casos: $\tau = f\left(\frac{du}{dy}, \mathrm{t}\right)$

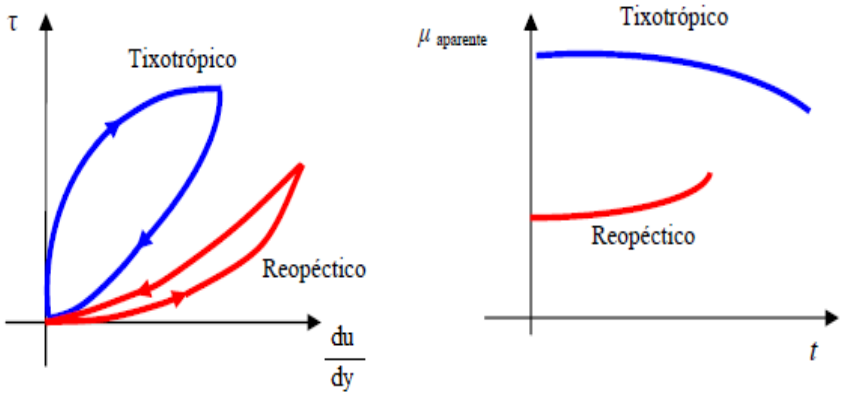

Fig. 8: Fluidos dependientes del tiempo.
Fuente: (Dalmati & Pérez, 2007).

- Fluidos visco elásticos

Estos fluidos muestran una recuperación elástica parcial cuando ya no se ejerce la tensión de corte. Tienen las características viscosas de los fluidos y las características elásticas de los sólidos.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Caracterización del viscosímetro Saybolt

La viscosidad de un fluido es una propiedad muy importante para el análisis del comportamiento de un líquido y el movimiento de un fluido cerca del límite de un sólido. La viscosidad es la resistencia de un fluido para romper o fluir, además es una medida de adhesividad/cohesividad o la propiedad de un fluido de fricción. La resistencia es causada por la fricción intermolecular ejercida cuando las capas de fluidos intentan deslizarse por otras.

En términos simples; la viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido para fluir. Conocer el valor de la viscosidad es necesario para un diseño adecuado de las temperaturas requeridas para el almacenamiento, bombeo o inyección de fluidos. Además es necesario saber las propiedades físico-químicas de los fluidos con que se va a trabajar.

Existen dos medidas relacionadas con la viscosidad: La viscosidad dinámica (o absoluta) y la viscosidad cinemática (Calderon and Vaca, 2013). Que pueden ser calculadas a partir de la medida de otras magnitudes, basándonos en estos dos tipos de viscosidades se puede determinar por ciertos métodos experimentales, entre estos tenemos: el viscosímetro Saybolt Universal, que es un método más sencillo de entender.

El viscosímetro Saybolt, es un instrumento utilizado para hacer pruebas netamente con fines industriales comparativos, especialmente en productos petroleros para amplios rangos de temperaturas, obteniendo el tiempo en segundos, el equipo se completa con la resistencia al calentamiento, termómetro y un agitador.

Esta prueba puede ser usada para determinar la Viscosidad Saybolt Universal o la Viscosidad Saybolt Furol y la viscosidad cinemática de emulsiones de asfalto. Lo cual cubre los procedimientos empíricos para determinar las viscosidades de productos derivados del petróleo a temperaturas específicas entre 21° y 99°C.

En este método de análisis, el tiempo de salida está en segundos en una muestra de 60ml. El fluido fluye a través de un orificio calibrado, medido bajo condiciones cuidadosamente controladas. El tiempo se corrige por un factor de orificio y se lo reporta como la viscosidad de la muestra a cierta temperatura. Este procedimiento es sencillo y requiere de un equipo simple, haciendo una conversión de SSU a viscosidad cinemática. El viscosímetro usa las normas ASTMD88 y D244, consideradas como los métodos estándar de prueba para la viscosidad cinemática de un fluido liviano y pesado.

Una vez conocidos los aspectos antes mencionados, se afirma que este equipo permite conocer que la viscosidad de un fluido se relaciona inversamente proporcional con la temperatura a la que se somete dicha sustancia, es decir mientras se aumenta la temperatura del fluido la viscosidad va a disminuir. (Coba et al., 2013)

3.1.1. Descripción del Viscosímetro Saybolt

Es un tipo de viscosímetro empírico y uno de los más confiables por su excelente precisión, lo que permite obtener la viscosidad de un líquido, la cual se determina con la medición del tiempo en segundos Saybolt que tarda en escurrir un determinado volumen de fluido libremente a través de un orificio calibrado.

El viscosímetro es de marca Koehler, modelo # K21410, Procedencia: USA, debe cumplir con las normas ASTM D445 y D446. Tiene capacidad para 4 tubos y un display de temperatura que indica la temperatura real y la temperatura configurada (en °C o °F). Como temperatura máxima tenemos 240 °C y la temperatura mínima es 21 °C. Su voltaje de alimentación es de 120 V/60Hz. De igual manera, el equipo tiene un baño calefactor, que le permite determinar las viscosidades a varias temperaturas, cuyo interior es de grueso calibre y está fabricado de un acero inoxidable altamente aislado, tiene facilidad de extracción para poder realizar su limpieza interna, este material debe ser resistente a la corrosión. (Calderon and Vaca, 2013).

En cuanto a los valores de viscosidad, están dados en Segundos Saybolt Universal (SSU), tomados a temperaturas específicas. Se utiliza la siguiente ecuación, descrita por HERSCHEL donde demostró que dicha expresión permitiría calcular la viscosidad cinemática experimental.

$$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t} \qquad (9)$$

Donde A y B, son las constantes obtenidas experimentalmente.

t, es el tiempo en Segundos Saybolt. [SSU]

ϑ, Viscosidad cinemática [cst]

Se muestra en la tabla 4 los valores de las constantes A y B, para viscosidades Saybolt, Redwood y Engler:

Tabla 4: Constantes A y B para viscosidades

Viscosidad	Constante A	Constante B
Saybolt	0.22	180
Redwood	0.26	171
Engler	0.147	374

Fuente: (Machuca and Yépez , 2009)
Elaboración: (López, 2018)

Por lo tanto, la relación entre la viscosidad y Segundos Saybolt la obtenemos con la siguiente expresión matemática:

$$\vartheta = (0{,}22xt) - \frac{180}{t} \qquad (50)$$

Donde:

ϑ = Viscosidad cinemática [cst]
t = Tiempo de escurrimiento [s]

Al hablar de este equipo se refiere a dos tipos de diámetros en los orificios calibrados por donde pasa el fluido:

- El de Punta Universal (SSU): usado para fluidos livianos, con valores de viscosidad en Segundos Saybolt Universal a temperaturas de 21 °C a 99 °C. El diámetro de su orificio es de Ø = 1.77 mm ± 0,015 mm.
- El de Punta Furol (SSF): usado para fluidos pesados, con valores de viscosidad en Segundos Saybolt Furol a temperaturas entre 120 °C a 240 °C. El diámetro de su orificio es de Ø = 3.15 mm ± 0,020 mm.

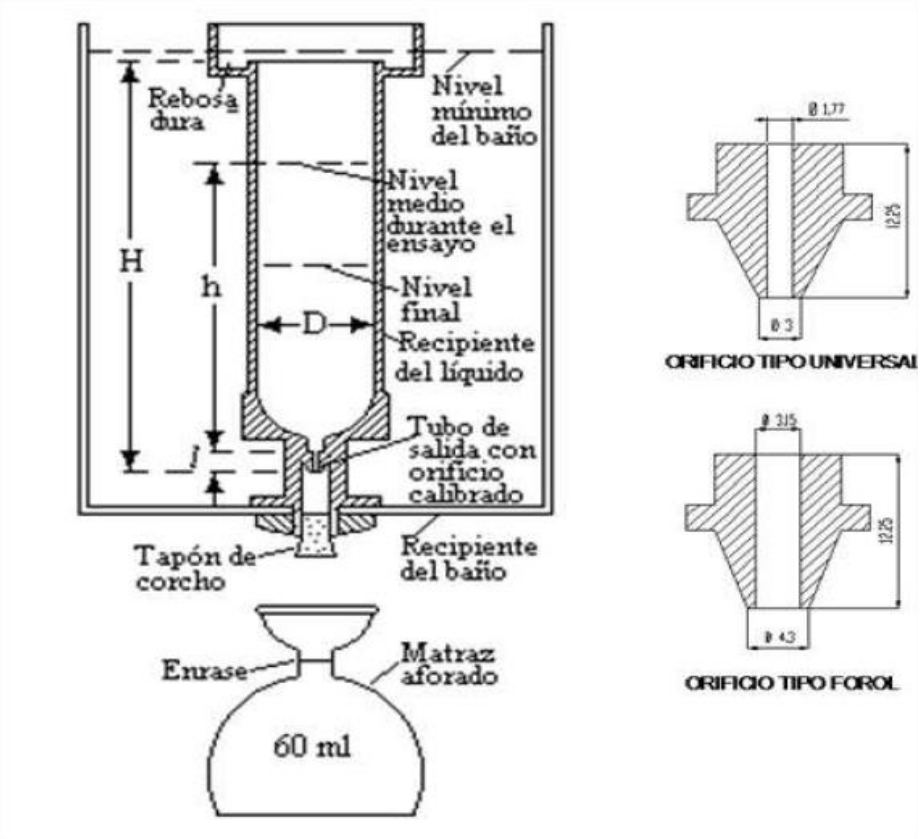

Fig. 9: Viscosímetro Saybolt demostrando los dos tipos de orificios
Fuente: (Machuca and Yépez , 2009)

El objetivo de este equipo es determinar la Viscosidad Saybolt Universal o la Viscosidad Saybolt Furol y la viscosidad cinemática de emulsiones de asfalto a temperaturas específicas entre 21° y 240°C. El viscosímetro Saybolt basa su principio en la facilidad que tiene un fluido para fluir por medio de un orificio de pequeño diámetro. Este equipo está compuesto por:

1. Porta Matraces
2. Matraz recibidor (60ml)
3. Tamiz para filtrar
4. Sensor de Temperatura (Real y Configurada)
5. Orificio Universal
6. Orificio Furol
7. Tubos Saybolt

8. Agitador
9. Embolo de Limpieza
10. Termómetro
11. Cronómetro

Fig. 10: Viscosímetro Saybolt
Fuente: (López, 2018)

3.1.2. Calibración del Equipo

Antes de empezar a trabajar, este equipo debe estar totalmente limpio con su respectivo solvente y secado eficiente, además se debe prevenir que el orificio no tenga obstrucciones. (Coba et al., 2013) Luego se prepara el Viscosímetro Saybolt de la manera siguiente:

1. El equipo de orificio universal o boquilla para lubricantes puede ser usado y destilado con tiempos de salida mayores a 32 seg para mayor

precisión. Los líquidos deben tener tiempos de salida mayores a 1000 seg no son convenientes para el análisis con este tipo de orificio.

2. El equipo de orificio Furol o boquilla para materiales residuales con tiempos de salida mayores a 25 seg son usados para una mayor precisión.
3. El viscosímetro debe estar completamente limpio, empleando un solvente de baja toxicidad, luego dicho solvente debe ser removido de todo el equipo y los matraces también deben ser limpiadas de la misma manera.
4. El viscosímetro tiene que instalarse en un área donde no esté expuesto al viento o lugares donde hayan cambios rápidos de temperatura, además debe estar libre de polvo o vapor, ya que pueden contaminar las muestras.
5. El porta matraz debe estar ubicado bajo el viscosímetro, así la graduación de la marca en el matraz será de 100 a 130 mm por debajo del punto de roció del ambiente de la cámara del equipo.
6. La cámara cilíndrica debe ser llenada menos a de 6 mm sobre el borde de desbordamiento del viscosímetro con un baño medio apropiado (agua o aceite).
7. Agitar adecuadamente y hacer control térmico para el baño que fue proporcionado. No se harán mediciones de viscosidad a temperaturas inferiores al punto de roció de la cámara del equipo.
8. Para la calibración y las pruebas del evaluador, la temperatura de la cámara debe mantenerse entre 20° C y 30°C y la temperatura actual será registrada.

3.1.3. Procedimiento del Equipo para la obtención de la viscosidad

Existen diversos equipos y procesos para medir la viscosidad, unos emplean principios fundamentales de mecánica de fluidos, mientras que otros equipos solo indican datos relativos de las viscosidades que pueden ser usadas para comparar diferentes fluidos (Coba et al., 2013).

Se detalla el procedimiento para realizar la prueba con el equipo de Viscosidad Saybolt:

1. El baño de temperatura es establecido y controlado al seleccionar la prueba de temperatura.

   -Pruebas estándar de temperatura para medidas de Viscosidad Saybolt Universal son: 21.1, 37.8, 54.4 y 98.9 °C.

   -Pruebas estándar de temperatura para medidas de Viscosidad Saybolt Furol son: 25, 37.8, 50 y 98.9 °C.

   -Otras pruebas estándares de temperatura usadas son: 60 y 82.2 °C.
2. El tapón de corcho estará insertado, teniendo un cordón adjunto para que sea más fácil removerlo, estará ubicado en la cámara de aire, en la parte inferior del viscosímetro. El corcho deberá estar lo suficientemente ajustado para prevenir el escape de aire.
3. Si la temperatura de la prueba seleccionada está por encima del cuarto de temperatura, la prueba puede acelerarse precalentando la muestra en el contenedor original a no más de 1.7 °C por encima de la temperatura de la prueba. Ninguna muestra deber ser precalentada dentro de los 28°C del punto de inflamación porque se pierde la volatilidad y podría alterar su composición.

4. La muestra debe estar bien agitada, para luego ser filtrada por el tamiz directamente en el viscosímetro hasta que el nivel esté por encima del anillo de sobre flujo.
5. Las muestras serán calentadas en su contenedor original a 50 °C, agitando para disolver y mezclar materiales cerosos. En el fondo del contenedor se verificará con un agitador que todos los materiales cerosos estén en solución y bien mezclados.
6. Se vierten aproximadamente 100 ml en unos matraces Erlenmeyer de 125 ml, se debe taponar empleando corchos de goma.
7. La muestra se mezclara bien y será removida del agua hirviendo, fuera del matraz será limpiado y secado, la muestra será vertida a través del embudo de filtro directamente en el viscosímetro hasta que el nivel esté por encima del anillo de sobre flujo.
8. La muestra en el viscosímetro será movida con el termómetro de viscosidad apropiado, equipado con un soporte. Se usa un movimiento circular de 30 a 50 rpm en un plano horizontal. Cuando la temperatura de la muestra se mantiene constante dentro de 0.03 °C con respecto a la temperatura de la prueba durante 1 min se mantiene constante, el termómetro será removido.
9. La punta del tubo de extracción se coloca inmediatamente en la galería de un punto y se aplica succión para remover aceite hasta el nivel en la galería que está por debajo del límite de desbordamiento. El tubo de extracción no debe tocar el borde, por ende la cabeza del líquido efectiva de la muestra será reducida.

10. El matraz receptor debe estar comprobado que sea seguro y que esté en una correcta posición, además se debe verificar que el corcho usado en el viscosímetro no esté roto, también se debe asegurar que los cronómetros al momento de tomar valores inicien al mismo tiempo.
11. Los cronómetros serán detenidos al instante en que la muestra llegue a la marca calibrada en el matraz recibidor (60ml), el tiempo de salida se grabará en segundos y estarán cercanos a 0.1 seg.

Fig. 11: Viscosímetro listo para realizar las respectivas pruebas
Fuente: (López, 2018)

3.2. Caracterización de los fluidos

3.2.1. Especificación del “Crudo 1”

El “Crudo 1” proviene del Bloque 16 - Campo AMO, el cual caracterizó sus propiedades petrofísicas mediante la utilización de las normas ASTM en su respectivo laboratorio y su pertinente análisis se realizó en el laboratorio de petróleo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

Este crudo es considerado pesado por su baja densidad, que está valorada en 16 ° API. (Industria Petrolera, 2018).

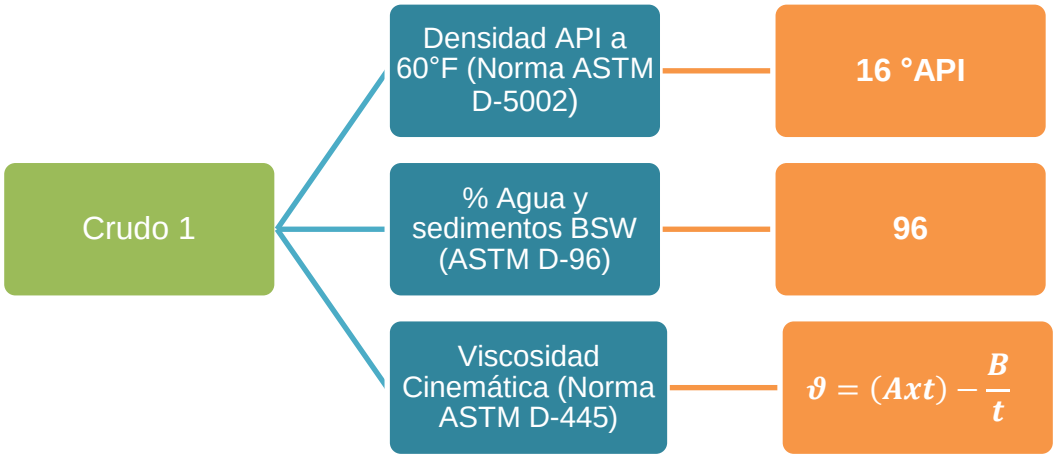

Fig. 12: Esquema de la caracterización del “Crudo 1”
Fuente: (Industria Petrolera, 2018)

3.2.2. Especificación del “Crudo 2”

El “Crudo 2” proviene del Bloque 21 - Campo YURALPA, el cual se caracterizó mediante la utilización de las normas ASTM en el laboratorio de la empresa Intertek y su respectivo análisis se realizó en el laboratorio de petróleo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

Este crudo es considerado pesado por su baja densidad, que está valorada en 17° API (Industria Petrolera, 2018).

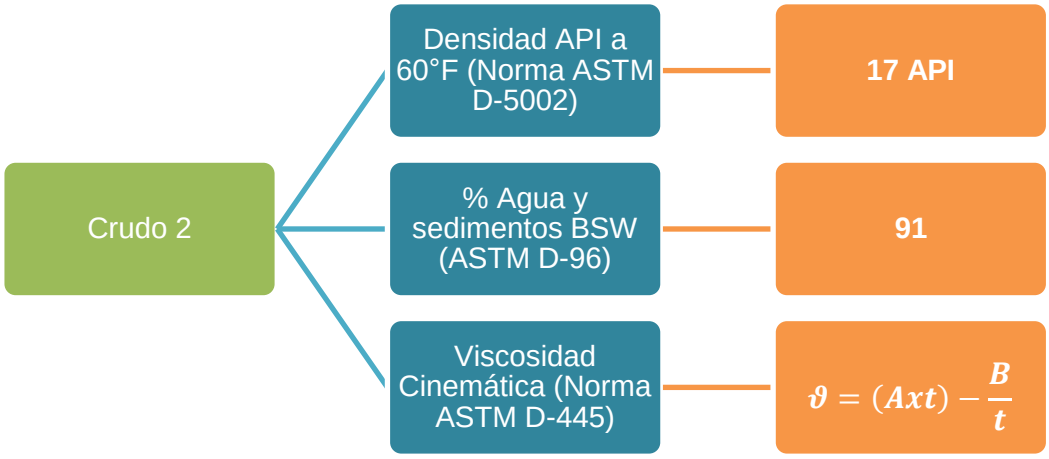

Fig. 13: Esquema de la caracterización del “Crudo 2"
Fuente: (Industria Petrolera, 2018)

3.3. Especificaciones del Demulsificante

El demulsificante utilizado para este estudio es conocido con el nombre comercial SR-1123 Desalting Emulsion Breaker, este es un rompe emulsión de desalinización primaria diseñado específicamente para romper emulsiones de agua en aceite con un amplio rango de pH. Además, ayuda a tratar eficazmente emulsiones de petróleo crudo en el proceso de desalación.

También mejora el proceso de deshidratación del crudo en los tanques de almacenamiento. (Industria Petrolera, 2018)

Tiene las siguientes propiedades físicas y químicas:

- Estado: Líquido
- Color: Amarillo a ámbar
- Olor: Característico
- Punto de inflamación: > 10 °C (ASTM D 93)
- Densidad relativa a 15,6 °C: 0,96 – 0,99 g/cm^3 (ASTM D 1298)
- Viscosidad Cinemática a 40°C: 25 – 100 cst (ASTM D 445)

La sustancia muestra las siguientes indicaciones de peligro:

- Nocivo en caso de ingestión.
- Líquidos y vapores muy inflamables
- Tóxico en contacto con la piel.
- Tóxico en caso de inhalación.
- Se sospecha que provoca cáncer.
- Tóxico para el medio ambiente.

Los Componentes peligrosos a indicar en el etiquetaje son:

- Metanol
- Solvent Naphtha (petroleum)
- Heavy Arom (< 10% naphthalene)

Recomendaciones para evitar accidentes con esta sustancia:

- Mantenerla alejada del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición.
- En caso de contacto con la piel (o cabello): Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Rociar la piel con agua/ducharse.
- En caso de inhalación: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que facilite la respiración.
- Guardar bajo llave.
- Eliminar el contenido o el recipiente conforme a la reglamentación local/regional/nacional/internacional.

Consejos para su manipulación:

- Usar el equipo de protección personal adecuado.
- No ingerir.
- Evitar el contacto con ojos, piel y ropa.
- No respirar los vapores o nieblas.
- Asegurar suficiente ventilación /aspiración en el puesto de trabajo. Abrir y manejar el recipiente con cuidado.
- Evitar la formación de aerosoles.

Medidas de prevención contra incendios y explosiones:

- Mantener alejadas las fuentes de encendido.
- No fumar.
- Tomar medidas contra las cargas electrostáticas.
- Tener preparados los aparatos respiratorios.

Exigencias con respecto al almacenaje y recipientes:

- Evitar el almacenamiento cerca de calor extremo, las fuentes de ignición o llamas expuestas.
- Almacenar en un lugar fresco y seco.
- Mantener el recipiente cerrado herméticamente.

Normas en caso de un almacenamiento conjunto:

- No almacenar junto con agentes oxidantes.
- No guardar junto con materiales inflamables.

Fig. 14: Demulsificante SR-1123, Desalting Emulsion Breaker
Fuente: (López, 2018)

3.4. Esquematización de los crudos

3.4.1. Esquematización del “Crudo 1”

El siguiente esquema detalla el proceso que se va a realizar en el laboratorio de petróleo con la muestra de crudo 1, sin formar emulsión y formando emulsión. Refiriéndose a la obtención de la viscosidad con respecto a los factores temperaturas y porcentajes de aditivo.

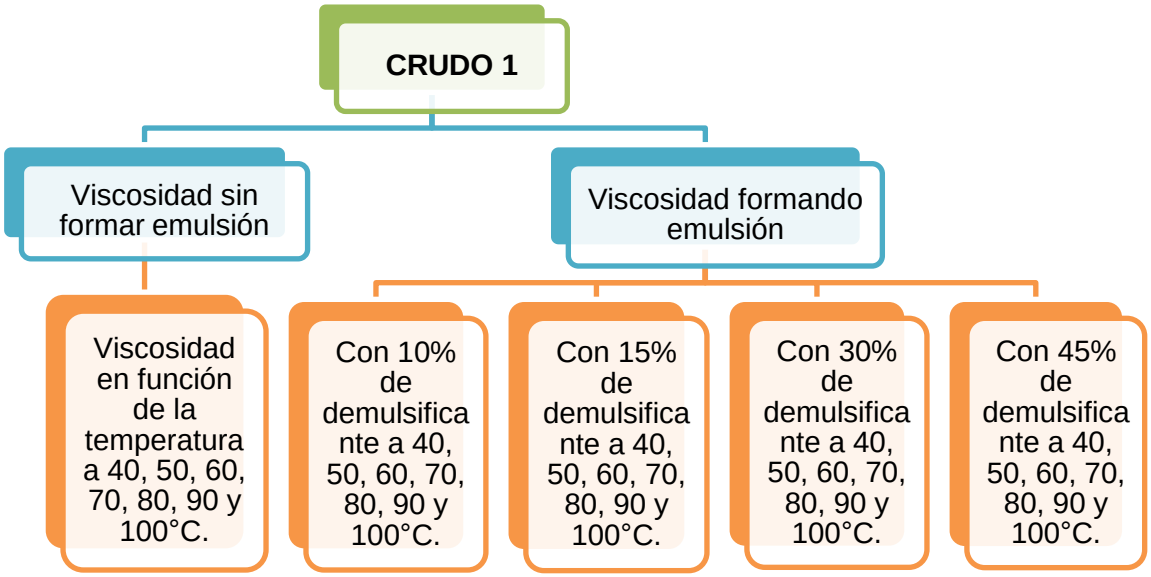

Fig. 15: Esquematización Experimental del “Crudo 1”
Fuente: (López, 2018).

3.4.2. Esquematización del “Crudo 2”

En el siguiente esquema se detalla el proceso que se va a ejecutar en el laboratorio de petróleo con la muestra de crudo 2, sin formar emulsión y formando emulsión. Refiriéndose a la determinación de la viscosidad con respecto a los factores temperaturas y porcentajes de demulsificante.

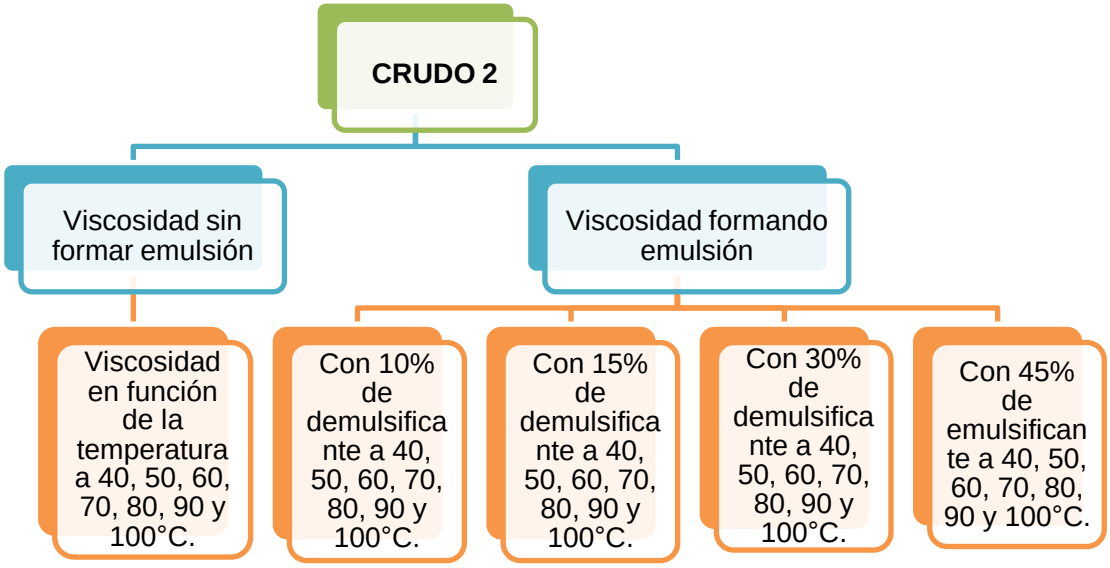

Fig. 16: Esquematización Experimental del "Crudo 2"
Fuente: (López, 2018).

3.5. Materiales y equipos

El viscosímetro Saybolt es un equipo calibrado a condiciones específicas, utilizado para determinar la viscosidad de un fluido, que se obtiene midiendo el tiempo en segundos Saybolt. Este equipo es usado netamente con fines industriales comparativos sobre todo para lubricantes y productos petroleros.

Para realizar correctamente las pruebas de laboratorio se necesitó de los siguientes materiales que se enumeran a continuación:

- Vasos de precipitación de 100 ml y 250ml
- Matraces (60ml)
- Agitador
- Tamiz para Filtrar
- Termómetro
- Cronómetro

- Guantes de Látex
- Mascarilla
- Mandil
- Muestras de crudo (16 y 17 °API)
- Muestra de demulsificante
- Viscosímetro Saybolt

3.6. Método para el análisis de las muestras

3.6.1. Preparación de los crudos

Para llevar a cabo la preparación de las muestras de crudo, se siguió el protocolo que lleva el laboratorio de petróleo de la ESPOL, el cual se detalla a continuación:

- Encender el viscosímetro Saybolt, observando el sensor de temperatura, se programa la parte configurada con las temperaturas que se vayan a utilizar para efectuar la prueba (en este caso de estudio sería a 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100°C), se apreciará como el sensor irá alcanzando la temperatura indicada.
- Colocar en un vaso de precipitación 100ml de crudo.
- Verificar que el viscosímetro Saybolt alcance la temperatura programada, la que será confirmada con el termómetro.
- Poner los 100ml de crudo dentro del contenedor del viscosímetro y medir aproximadamente 10 segundos con el cronómetro.
- Reiniciar el cronómetro.

- Comprobar que en el porta matraz y debajo del orificio de salida estén colocados y ubicados correctamente los matraces de 60ml. Revisar que los corchos de los orificios estén adecuadamente tapados.
- Retirar el corcho de los orificios que mantiene al crudo dentro del contenedor del viscosímetro y, en ese instante tomar el tiempo con el cronómetro hasta que el crudo llene los 60ml del matraz.
- Colocar el corcho en el orificio del contenedor del viscosímetro para evitar derrames sobre el equipo.
- Retirar el sobrante de crudo que quedo en el contenedor del viscosímetro colocando debajo un vaso de precipitación, se debe verificar que el contenedor esté completamente libre de cualquier fluido restante.
- Limpiar el contenedor cuidadosamente (de preferencia con diluyente), antes de realizar la siguiente prueba, para así evitar malas lecturas.
- Programar la siguiente temperatura con la que se vaya a realizar una nueva prueba, y repetir los pasos ya antes mencionados.

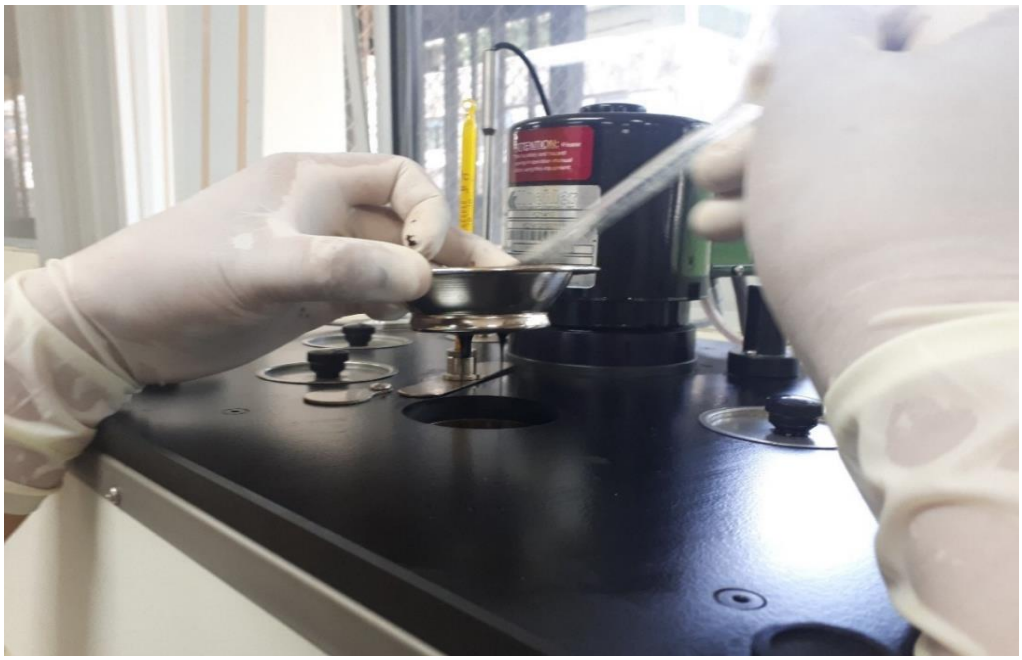

Fig. 17: Preparación de la muestra de crudo
Fuente: (López, 2018).

3.6.2. Preparación de las emulsiones

Para llevar a cabo la preparación de las muestras de las emulsiones, se siguió el protocolo que lleva el laboratorio de petróleo de la ESPOL, el cual se detalla a continuación:

- Encender el viscosímetro Saybolt, programar la temperatura a la que se vaya a realizar la prueba (en nuestro caso de estudio sería a 30, 50, 75 y 100°C).
- Preparar las emulsiones, crudo más demulsificante al 10%, 15%, 30% y 45% de concentración para un volumen total de 100ml.
- Colocar en vasos de precipitación 100ml cada emulsión.
- Verificar que el viscosímetro Saybolt alcanzó la temperatura programada con el termómetro.

- Colocar los 100ml de la emulsión que se vaya a analizar dentro del contenedor del viscosímetro y tomar aproximadamente 10 segundos con el cronómetro.
- Reiniciar el cronómetro.
- Retirar el corcho que mantiene a la emulsión dentro del contenedor del viscosímetro y en ese instante tomar el tiempo con el cronómetro hasta que la emulsión llene los 60ml del matraz.
- Colocar el corcho en el orificio del contenedor del viscosímetro.
- Retirar el sobrante de emulsión del contenedor.
- Limpiar el contenedor (de preferencia con diluyente), antes de realizar la siguiente prueba.
- Programar la siguiente temperatura con la que se vaya a realizar la siguiente prueba.

Fig. 18: Preparación de la Emulsión con varios porcentajes de aditivo
Fuente: (López, 2018).

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Las pruebas de laboratorio se realizaron con crudos de 16° y 17° API, por un lado sin adicionar demulsificante, y por otro, adicionando demulsificante en diferentes porcentajes, obteniendo resultados sobre los que se realizó el análisis correspondiente. Se aplicó la expresión matemática $\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$ **,** para determinar el valor de la viscosidad cinemática.

4.1. Análisis experimental del "Crudo 1" a diferentes temperaturas

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 16° API, se detallan a continuación:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizó la prueba de laboratorio sin considerar el demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 1144 SSU, con una viscosidad cinemática de 251.52 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C sin demulsificante, el resultado del tiempo para este ensayo fue de 603 SSU, con una viscosidad cinemática de 132.36 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, sin adición de demulsificante, se obtuvo como resultado un tiempo de 347 SSU, con una viscosidad cinemática de 75.82 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizó su respectiva prueba de laboratorio sin considerar el demulsificante,

obteniendo como resultado un tiempo de 229 SSU y una viscosidad cinemática de 49.59 cst.

- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C sin agregar demulsificante, el tiempo dio como resultado 182 SSU y se obtuvo una viscosidad cinemática de 39.05 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C sin considerar el demulsificante, se obtuvo como resultado un tiempo de 157 SSU, con una viscosidad cinemática de 33.39 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C sin adición de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 145 SSU, con una viscosidad de 30.66 cst.

Tabla 5: Tabulación de datos del “Crudo 1” a diferentes temperaturas

	0% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$	**Viscosidad (cst)**
40	1144	$\vartheta = (0.22x1144) - \frac{180}{1144}$	251.52
50	603	$\vartheta = (0.22x603) - \frac{180}{603}$	132.36
60	347	$\vartheta = (0.22x347) - \frac{180}{347}$	75.82
70	229	$\vartheta = (0.22x229) - \frac{180}{229}$	49.59
80	182	$\vartheta = (0.22x182) - \frac{180}{182}$	39.05
90	157	$\vartheta = (0.22x157) - \frac{180}{157}$	33.39
100	145	$\vartheta = (0.22x145) - \frac{180}{145}$	30.66

Elaboración: (López, 2018).

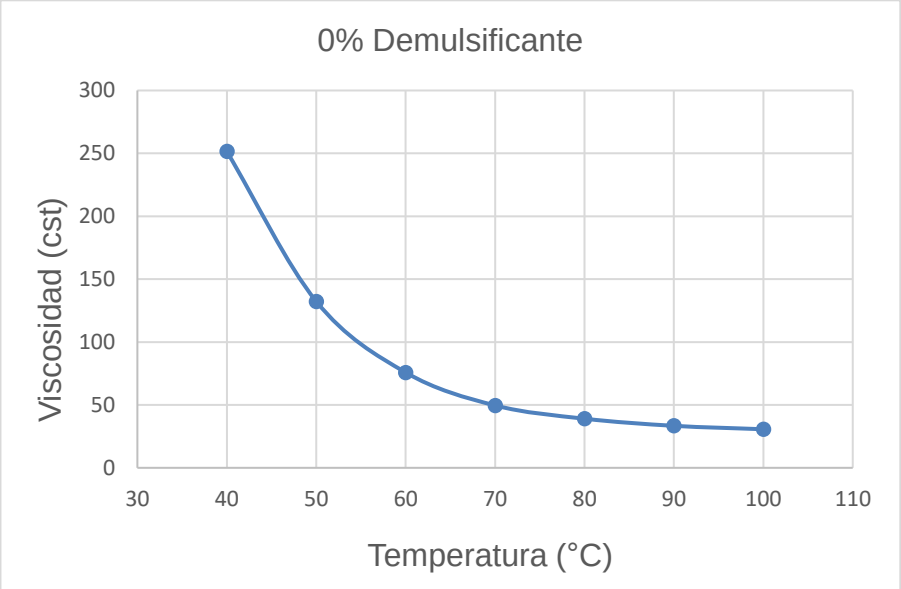

Fig. 19: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del “Crudo 1” sin demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.2. Análisis experimental del “Crudo 1” a diferentes temperaturas con 10% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 16° API, son los siguientes:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizó la prueba de laboratorio con 10% de demulsificante, en el cual se obtuvo como resultado un tiempo de 934 SSU, con una viscosidad cinemática de 205.29 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C, con adición del 10% de demulsificante, se obtuvo como resultado un tiempo de 400 SSU, con una viscosidad cinemática de 87.55 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, considerando adicionar el 10% de demulsificante, dio como resultado un tiempo de 208 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 44.89 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizó su respectiva prueba de laboratorio adicionando el 10% de demulsificante, se obtuvo como resultado un tiempo de 127 SSU y una viscosidad cinemática de 26.52 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C considerando un 10% de demulsificante, el tiempo dio como resultado 85 SSU y se obtuvo una viscosidad cinemática de 16.58 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C con 10% de demulsificante, teniendo como resultado del tiempo para esta prueba un valor de 72 SSU, se obtuvo una viscosidad cinemática de 13.34 cst.

- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C agregando 10% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 68 SSU, con una viscosidad cinemática de 12.31 cst.

Tabla 6: Tabulación de datos del "Crudo 1" a diferentes temperaturas con 10% de demulsificante

	10% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$	**Viscosidad (cst)**
40	934	$\vartheta = (0.22x934) - \frac{180}{934}$	205.29
50	400	$\vartheta = (0.22x400) - \frac{180}{400}$	87.55
60	208	$\vartheta = (0.22x208) - \frac{180}{208}$	44.89
70	127	$\vartheta = (0.22x127) - \frac{180}{127}$	26.52
80	85	$\vartheta = (0.22x85) - \frac{180}{85}$	16.58
90	72	$\vartheta = (0.22x72) - \frac{180}{72}$	13.34
100	68	$\vartheta = (0.22x68) - \frac{180}{68}$	12.31

Elaboración: (López, 2018).

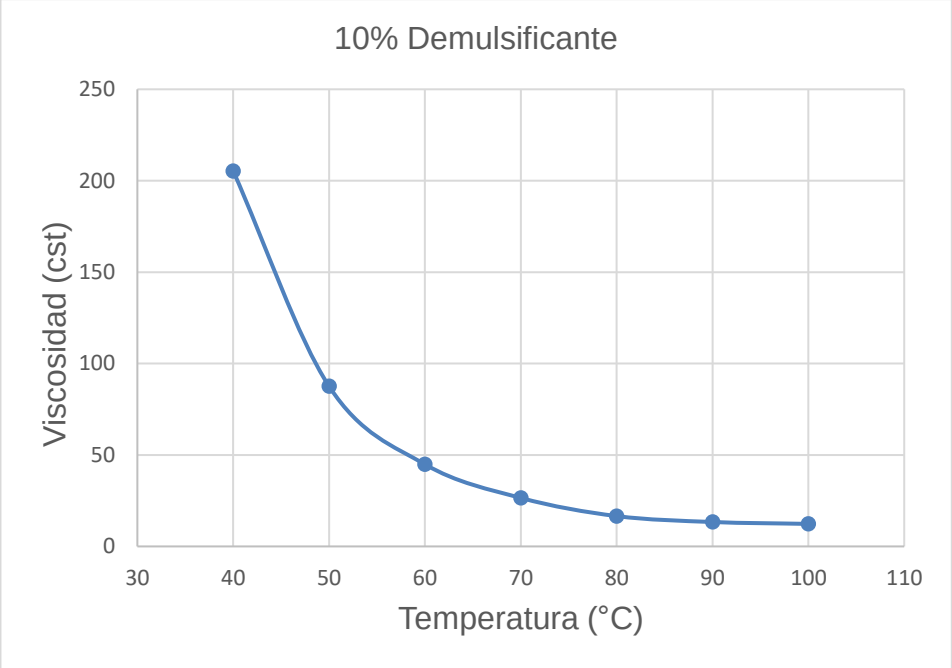

Fig. 20: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 1" con 10% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.3. Análisis experimental del "Crudo 1" a diferentes temperaturas con 15% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 16° API, son los siguientes:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las respectivas pruebas de laboratorio considerando el 15% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 693 SSU, con una viscosidad cinemática de 152.20 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C con adición del 15% de demulsificante, el valor del tiempo para ese ensayo fue de 262 SSU, donde se obtuvo una viscosidad cinemática de 56.95 cst.

- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, con 15% de demulsificante, resulto un tiempo de 124 SSU y una viscosidad cinemática de 25.83 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizó su respectiva prueba de laboratorio agregando 15% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 82 SSU y una viscosidad cinemática de 15.84 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C con 15% de demulsificante, el tiempo dio como resultado 72 SSU y se obtuvo una viscosidad cinemática de 13.34 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C con un 15% de demulsificante, teniendo como resultado del tiempo un valor de 69 SSU, con una viscosidad cinemática de 12.57 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C con 15% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 67 SSU y una viscosidad de cinemática 12.05 cst.

Tabla 7: Tabulación de datos del "Crudo 1"a diferentes temperaturas con 15% de demulsificante

	15% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\boldsymbol{\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}}$	**Viscosidad (cst)**
40	693	$\vartheta = (0.22x693) - \frac{180}{693}$	152.20
50	262	$\vartheta = (0.22x262) - \frac{180}{262}$	56.95
60	124	$\vartheta = (0.22x124) - \frac{180}{124}$	25.83
70	82	$\vartheta = (0.22x82) - \frac{180}{82}$	15.84
80	72	$\vartheta = (0.22x72) - \frac{180}{72}$	13.34
90	69	$\vartheta = (0.22x69) - \frac{180}{69}$	12.57
100	67	$\vartheta = (0.22x67) - \frac{180}{67}$	12.05

Elaboración: (López, 2018).

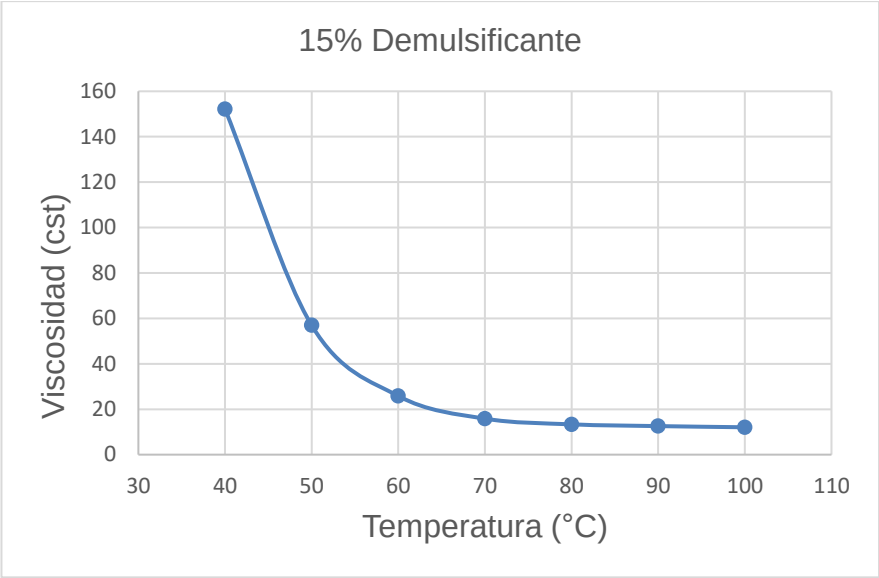

Fig. 21: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 1" con 15% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.4. Análisis experimental del "Crudo 1" a diferentes temperaturas con 30% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 16° API, se describen a continuación:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio con 30% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 522 SSU y una viscosidad cinemática de 114.50 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C con 30% de demulsificante, el resultado del tiempo para ese ensayo fue de 185 SSU, donde se obtuvo una viscosidad cinemática de 39.73 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, con 30% de demulsificante, dio como resultado un tiempo de 98 SSU, con una viscosidad cinemática de 19.72 cst.

- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizaron sus respectivas pruebas de laboratorio con 30% de demulsificante y se obtuvo como resultado un tiempo de 74 SSU, con una viscosidad cinemática de 13.85 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C con 30% de demulsificante, el tiempo dio como resultado 69 SSU, con una viscosidad cinemática de 12.57 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C, se realizaron sus respectivas pruebas de laboratorio con 30% de demulsificante y se obtuvo como resultado un tiempo de 67 SSU con una viscosidad cinemática de 12.05 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C con 30% de demulsificante, teniendo como resultado un tiempo de 64 SSU y una viscosidad cinemática de 11.27 cst.

Tabla 8: Tabulación de datos del “Crudo 1” a diferentes temperaturas con 30% de demulsificante

	30% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\boldsymbol{\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}}$	**Viscosidad (cst)**
40	522	$\vartheta = (0.22x522) - \frac{180}{522}$	114.50
50	185	$\vartheta = (0.22x185) - \frac{180}{185}$	39.73
60	98	$\vartheta = (0.22x98) - \frac{180}{98}$	19.72
70	74	$\vartheta = (0.22x74) - \frac{180}{74}$	13.85
80	69	$\vartheta = (0.22x69) - \frac{180}{69}$	12.57
90	67	$\vartheta = (0.22x67) - \frac{180}{67}$	12.05
100	64	$\vartheta = (0.22x64) - \frac{180}{64}$	11.27

Elaboración: (López, 2018).

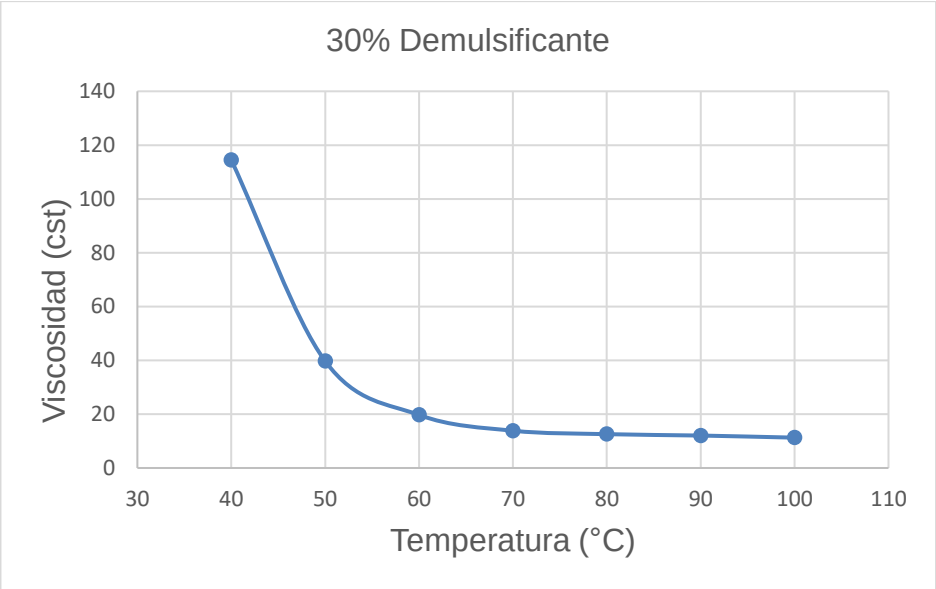

Fig. 22: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 1" con 30% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.5. Análisis experimental del "Crudo 1" a diferentes temperaturas con 45% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 16° API, se definen a continuación:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio con 45% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 359 SSU, con una viscosidad cinemática de 78.48 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C con 45% de demulsificante, el resultado del tiempo para ese ensayo fue de 141 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 29.74 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, con adición del 45% de demulsificante, dio como resultado un tiempo de 83 SSU, con una viscosidad cinemática de 16.09 cst.

- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizaron sus respectivas pruebas de laboratorio con 45% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 68 SSU y una viscosidad cinemática de 12.31 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C considerando el 45% de demulsificante, se determinó al tiempo con un resultado de 66 SSU y una viscosidad cinemática de 11.79 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C, se realizaron sus respectivas pruebas de laboratorio con un 45% de demulsificante, estableciendo como resultado un tiempo de 63 SSU, con una viscosidad cinemática de 11.00 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C con 45% de demulsificante, determinando como resultado un tiempo de 62 SSU, y una viscosidad cinemática de 10.74 cst

.

Tabla 9: Tabulación de datos del "Crudo 1" a diferentes temperaturas con 45% de demulsificante

	45% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$	**Viscosidad (cst)**
40	359	$\vartheta = (0.22x359) - \frac{180}{359}$	78.48
50	141	$\vartheta = (0.22x141) - \frac{180}{141}$	29.74
60	83	$\vartheta = (0.22x83) - \frac{180}{83}$	16.09
70	68	$\vartheta = (0.22x68) - \frac{180}{68}$	12.31
80	66	$\vartheta = (0.22x66) - \frac{180}{68}$	11.79
90	63	$\vartheta = (0.22x63) - \frac{180}{63}$	11.00
100	62	$\vartheta = (0.22x62) - \frac{180}{62}$	10.74

Elaboración: (López, 2018).

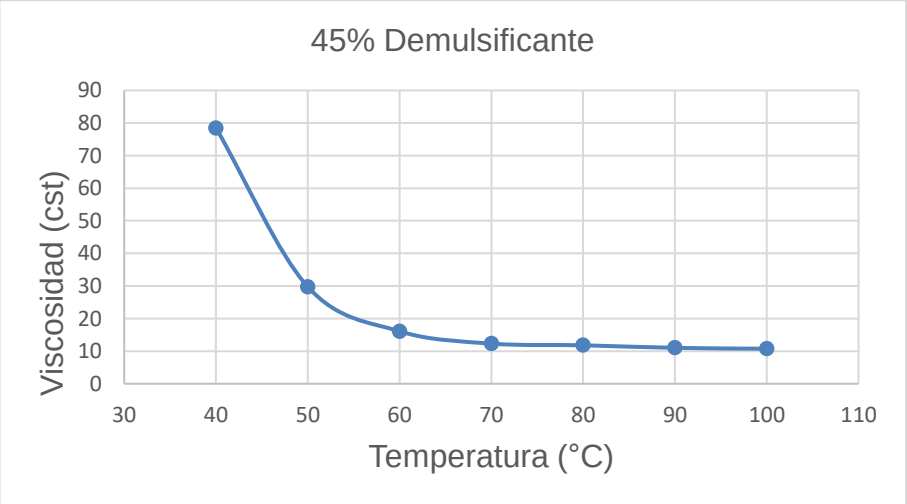

Fig. 23: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 1" con 45% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.6. Análisis experimental del “Crudo 2” a diferentes temperaturas

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 17° API, se detallan a continuación:

- Para el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio sin considerar el demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 1021 SSU y una viscosidad cinemática de 224.44 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C sin demulsificante, el resultado del tiempo para ese ensayo fue de 581 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 127.51 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio sin demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 317 SSU y una viscosidad cinemática de 69.17 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizó su respectiva prueba de laboratorio sin considerar el demulsificante, teniendo como resultado un tiempo de 204 SSU y una viscosidad cinemática de 44.00 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C sin agregar demulsificante, el tiempo dio como resultado 161 SSU, con una viscosidad cinemática de 34.30 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C sin demulsificante se obtuvo como resultado un tiempo de 134 SSU y una viscosidad cinemática de 28.14 cst.

- En el crudo sometido a una temperatura de 100 °C sin adición de demulsificante, donde el resultado del tiempo para ese ensayo es de 126 SSU, con una viscosidad cinemática de 26.29 cst.

Tabla 10: Tabulación de datos del “Crudo 2” a diferentes temperaturas

	0% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$	**Viscosidad (cst)**
40	1021	$\vartheta = (0.22x1021) - \frac{180}{1021}$	224.44
50	581	$\vartheta = (0.22x581) - \frac{180}{581}$	127.51
60	317	$\vartheta = (0.22x317) - \frac{180}{317}$	69.17
70	204	$\vartheta = (0.22x204) - \frac{180}{204}$	44.00
80	161	$\vartheta = (0.22x161) - \frac{180}{161}$	34.30
90	134	$\vartheta = (0.22x134) - \frac{180}{134}$	28.14
100	126	$\vartheta = (0.22x126) - \frac{180}{126}$	26.29

Elaboración: (López, 2018).

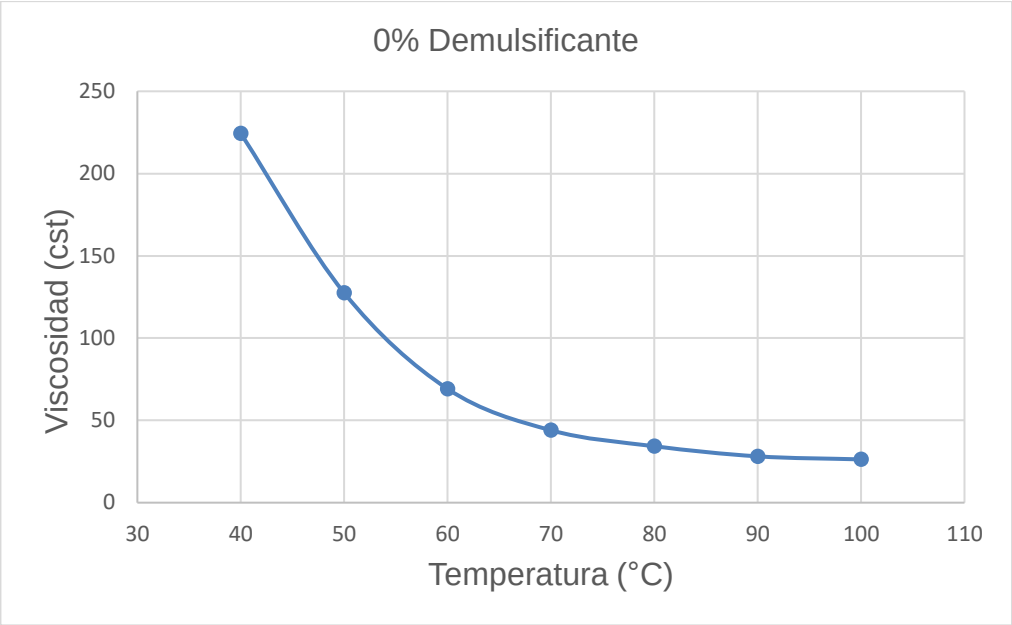

Fig. 24: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 2" sin demulsificante.
Elaboración: (López, 2018).

4.7. Análisis experimental del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 10% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 17° API, son los siguientes:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las respectivas pruebas de laboratorio considerando el 10% de demulsificante, teniendo como resultado un tiempo de 713 SSU, con una viscosidad cinemática de 156.61 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C agregando 10% de demulsificante, el resultado del tiempo para ese ensayo es de 348 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 76.04 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, se consideró el 10% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 179 SSU, con una viscosidad cinemática de 38.37 cst.

- En el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizaron las respectivas pruebas de laboratorio con 10% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 107 SSU y una viscosidad cinemática de 21.86 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C con dosificación del 10% de demulsificante, el tiempo dio como resultado 81 SSU y se obtuvo una viscosidad cinemática de 15.60 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 90 °C, se realizaron sus respectivas pruebas de laboratorio con 10% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 71 SSU y una viscosidad cinemática de 13.08 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C con 10% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 65 SSU, con una viscosidad cinemática de 11.53 cst.

Tabla 11: Tabulación de datos del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 10% de demulsificante

	10% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}$	**Viscosidad (cst)**
40	713	$\vartheta = (0.22x713) - \frac{180}{713}$	156.61
50	348	$\vartheta = (0.22x348) - \frac{180}{348}$	76.04
60	179	$\vartheta = (0.22x179) - \frac{180}{179}$	38.37
70	107	$\vartheta = (0.22x107) - \frac{180}{107}$	21.86
80	81	$\vartheta = (0.22x81) - \frac{180}{81}$	15.60
90	71	$\vartheta = (0.22x71) - \frac{180}{71}$	13.08
100	65	$\vartheta = (0.22x65) - \frac{180}{65}$	11.53

Elaboración: (López, 2018).

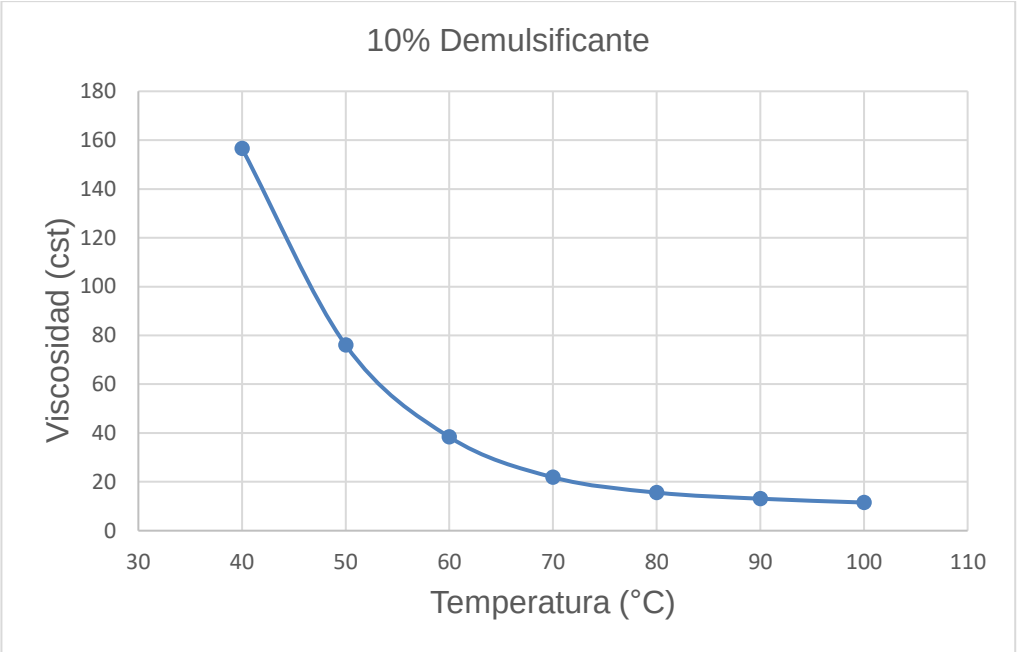

Fig. 25: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 2" con 10% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.8. Análisis experimental del crudo 2 a diferentes temperaturas con 15% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 17° API, son los siguientes:

- El crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizó la prueba de laboratorio con 15% de demulsificante, se obtuvo como resultado un tiempo de 492 SSU y una viscosidad cinemática de 107.87 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 50 °C con 15% de demulsificante el resultado del tiempo para ese ensayo es de 234 SSU, se obtuvo una viscosidad cinemática de 50.71 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, se agregó 15% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 122 SSU, con una viscosidad cinemática de 25.36 cst.

- Para el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizaron las respectivas pruebas de laboratorio agregando el 15% de demulsificante, para obtener como resultado un tiempo de 80 SSU y una viscosidad cinemática de 15.35 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C, se realizaron las respectivas pruebas de laboratorio agregando el 15% de demulsificante, para obtener como resultado un tiempo de 69 SSU, con una viscosidad cinemática de 12.57 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90°C considerando el 15% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 65 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 11.53 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 100 °C, se le agregó un 15% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 62 SSU, con una viscosidad cinemática de 10.74 cst.

Tabla 12: Tabulación de datos del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 15% de demulsificante

	15% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\boldsymbol{\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}}$	**Viscosidad (cst)**
40	492	$\vartheta = (0.22x492) - \frac{180}{492}$	107.87
50	234	$\vartheta = (0.22x234) - \frac{180}{234}$	50.71
60	122	$\vartheta = (0.22x122) - \frac{180}{122}$	25.36
70	80	$\vartheta = (0.22x80) - \frac{180}{80}$	15.35
80	69	$\vartheta = (0.22x69) - \frac{180}{69}$	12.57
90	65	$\vartheta = (0.22x65) - \frac{180}{65}$	11.53
100	62	$\vartheta = (0.22x62) - \frac{180}{62}$	10.74

Elaboración: (López, 2018).

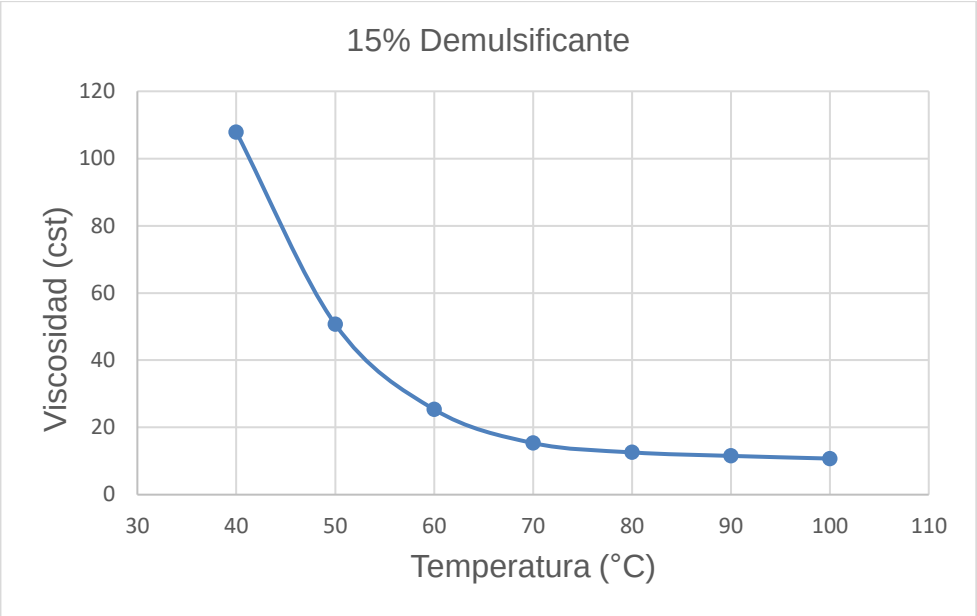

Fig. 26: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 2" con 15% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.9. Análisis experimental del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 30% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 17° API, son los siguientes:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio con 30% de demulsificante, donde se obtuvo como resultado un tiempo de 338 SSU, con una viscosidad cinemática de 73.83 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 50 °C con 30% de demulsificante, el resultado del tiempo para ese ensayo fue de 161 SSU, con una viscosidad cinemática de 34.30 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, se agregó 30% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 87 SSU, con una viscosidad cinemática de 17.07 cst.

- Para el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio con 30% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 72 SSU y una viscosidad cinemática de 13.34 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 80 °C, se realizó la respectiva prueba de laboratorio con 30% de demulsificante, teniendo como resultado un tiempo de 65 SSU y una viscosidad cinemática de 11.53 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90°C considerando un 30% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 63 SSU, obteniendo una viscosidad cinemática de 11.00 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100°C con 30% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 61 SSU, estableciendo una viscosidad cinemática de 10.47 cst.

Tabla 13: Tabulación de datos del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 30% de demulsificante

	30% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\boldsymbol{\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}}$	**Viscosidad (cst)**
40	338	$\vartheta = (0.22x338) - \frac{180}{338}$	73.83
50	161	$\vartheta = (0.22x161) - \frac{180}{161}$	34.30
60	87	$\vartheta = (0.22x87) - \frac{180}{87}$	17.07
70	72	$\vartheta = (0.22x72) - \frac{180}{72}$	13.34
80	65	$\vartheta = (0.22x65) - \frac{180}{65}$	11.53
90	63	$\vartheta = (0.22x63) - \frac{180}{63}$	11.00
100	61	$\vartheta = (0.22x61) - \frac{180}{61}$	10.47

Elaboración: (López, 2018).

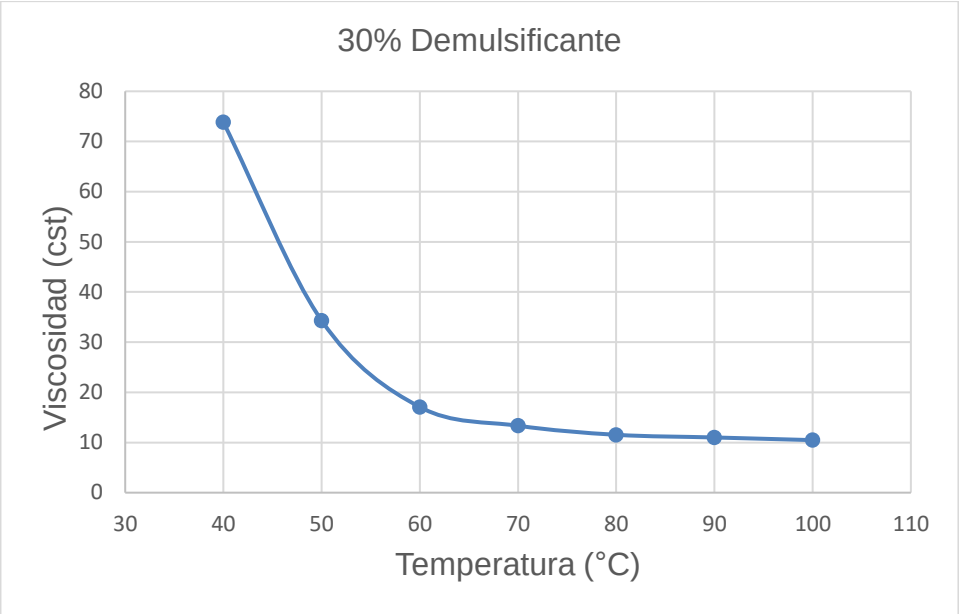

Fig. 27: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 2" con 30% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.10. Análisis experimental del "Crudo 2" a diferentes temperaturas con 45% de demulsificante

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio con el crudo de 17° API, se detallan a continuación:

- En el crudo sometido a una temperatura de 40°C con 45% de demulsificante, se determinó como resultado un tiempo de 243 SSU, con una viscosidad cinemática de 52.72 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 50 °C, se realizó la prueba de laboratorio con adición del 45% de demulsificante, obteniendo como resultado un tiempo de 115 SSU, con una viscosidad cinemática de 23.73 cst.
- Para el crudo sometido a una temperatura de 60 °C, se le agregó 45% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 77 SSU, donde se obtuvo una viscosidad cinemática de 14.60 cst.

- Para el crudo sometido a una temperatura de 70 °C, se realizó la respectiva prueba de laboratorio con un 45% de demulsificante, donde se obtuvo como resultado un tiempo de 66 SSU y una viscosidad cinemática de 11.79 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 80 °C, se le agregó un 45% de demulsificante, dando como resultado un tiempo de 62 SSU, con una viscosidad cinemática de 10.74 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 90 °C con 45% de demulsificante, donde el resultado del tiempo para ese ensayo fue de 59 SSU, con una viscosidad cinemática de 9.93 cst.
- En el crudo sometido a una temperatura de 100 °C, se realizaron las pruebas de laboratorio con 45% de demulsificante, estableciendo como resultado un tiempo de 57 SSU y una viscosidad cinemática de 9.38 cst.

Tabla 14: Tabulación de datos del “Crudo 2” a diferentes temperaturas con 45% de demulsificante

	45% Demulsificante		
T (°C)	**Tiempo (SSU)**	$\boldsymbol{\vartheta = (Axt) - \frac{B}{t}}$	**Viscosidad (cst)**
40	243	$\vartheta = (0.22x243) - \frac{180}{243}$	52.72
50	115	$\vartheta = (0.22x115) - \frac{180}{115}$	23.73
60	77	$\vartheta = (0.22x77) - \frac{180}{77}$	14.60
70	66	$\vartheta = (0.22x66) - \frac{180}{66}$	11.79
80	62	$\vartheta = (0.22x62) - \frac{180}{62}$	10.74
90	59	$\vartheta = (0.22x59) - \frac{180}{59}$	9.93
100	57	$\vartheta = (0.22x57) - \frac{180}{57}$	9.382105

Elaboración: (López, 2018).

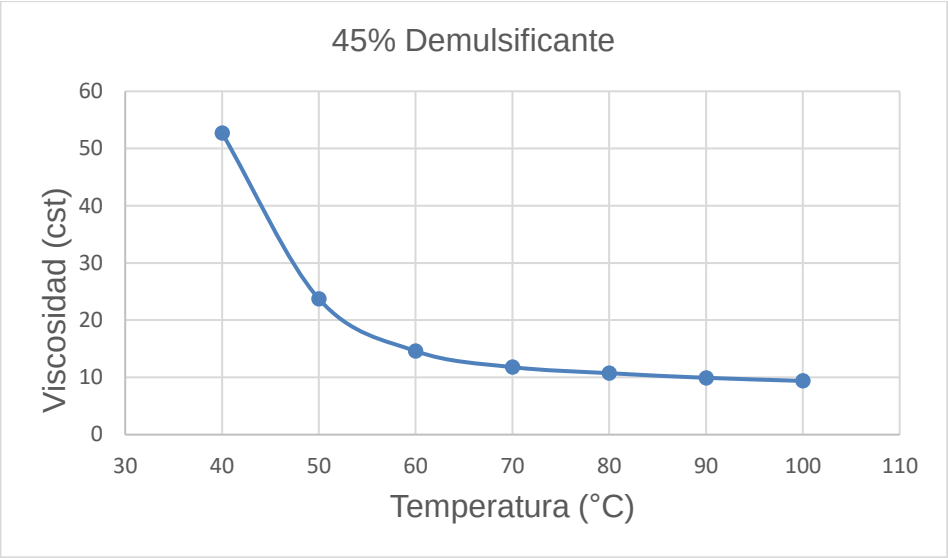

Fig. 28: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 2" con 45% de demulsificante
Elaboración: (López, 2018).

4.11. Análisis General del "Crudo 1"

Para el crudo 1, en la figura 29 el efecto del demulsificante es óptimo entre la temperatura de 40 y 60 °C, donde la disminución de la viscosidad es más pronunciada, ya que se tiene para el crudo con 0% de aditivo una viscosidad de 251,52 cst. En cambio cuando el crudo tiene un 45% de aditivo su viscosidad cinemática reduce notablemente a 78,48 cst, lo que no ocurre si la temperatura sigue incrementando. Los óptimos porcentajes de adición del demulsificante son entre el 10% y 15% por evidenciar una mejor respuesta en la declinación de las curvas de viscosidad, puesto que a porcentajes entre 30% y 45%, inicialmente registra una notable reducción de la viscosidad cinemática, pero al aumentar la temperatura a valores superiores a 40 °C su comportamiento se vuelve constante. La adición del 15% de demulsificante logra una reducción de 99 cst en la viscosidad cinemática.

Tabla 15: Análisis experimental General del “Crudo 1” a diferentes condiciones

16° API										
	0% Demulsificante		10% Demulsificante		15% Demulsificante		30% Demulsificante		45% Demulsificante	
T (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)
40	1144	251.52	934	205.29	693	152.20	522	114.50	359	78.48
50	603	132.36	400	87.55	262	56.95	185	39.79	141	29.74
60	347	75.82	208	44.89	124	25.83	98	19.72	83	16.09
70	229	49.59	127	26.52	82	15.84	74	13.85	68	12.31
80	182	39.05	85	16.58	72	13.34	69	12.57	66	11.79
90	157	33.39	72	13.34	69	12.57	67	12.05	63	11.00
100	145	30.66	68	12.31	67	12.05	64	11.27	62	10.74

Elaboración: (López, 2018).

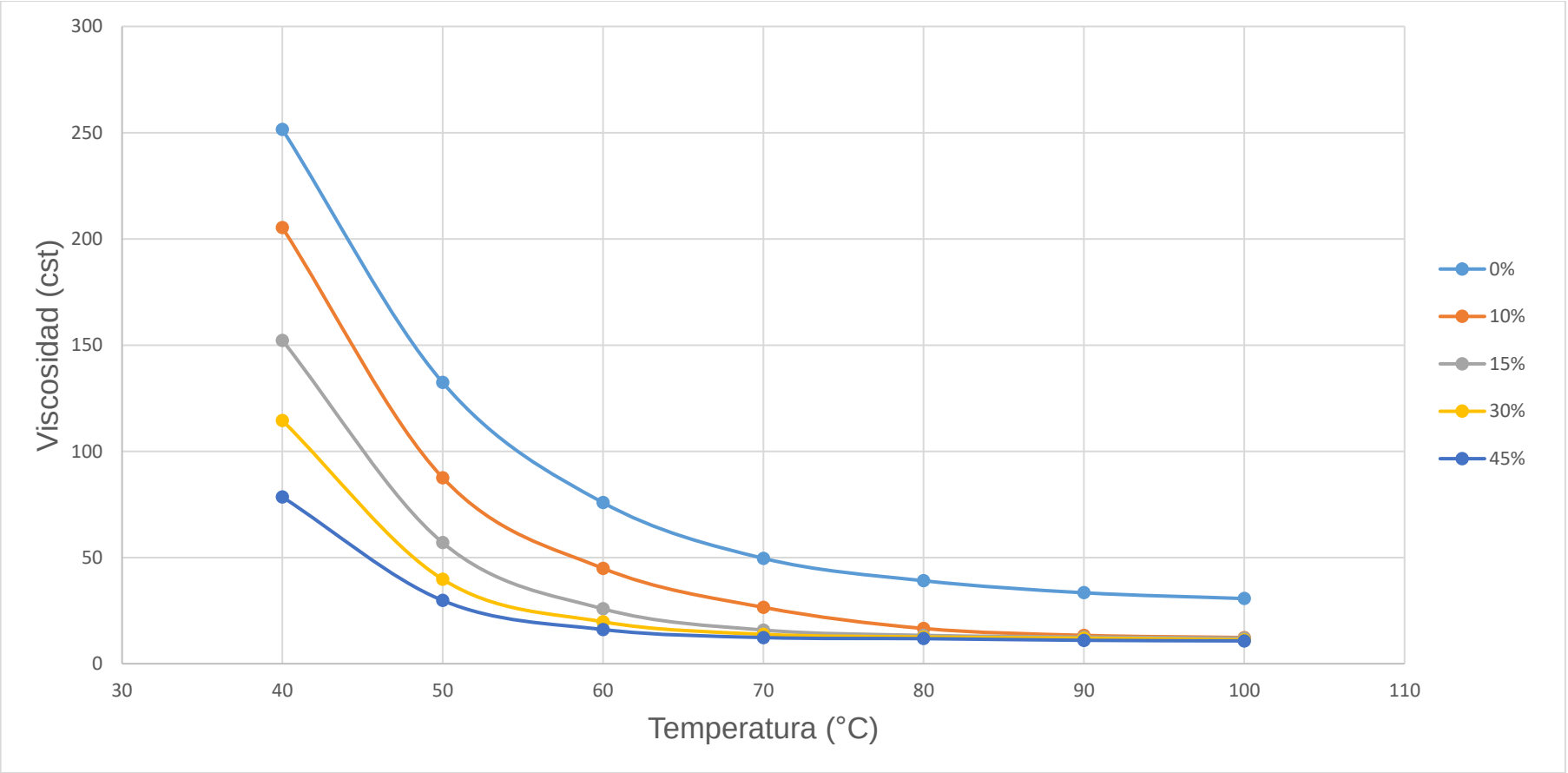

Fig. 29: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del "Crudo 1"
Elaboración: (López, 2018).

4.12. Análisis General del “Crudo 2”

Para el crudo 2, en la figura 30 el efecto del demulsificante es óptimo entre la temperatura de 40 y 60 °C, donde la disminución de la viscosidad cinemática es más pronunciada ya que para el crudo con 0% de aditivo se obtiene una viscosidad cinemática de 224,44 cst, en cambio cuando el crudo tiene un 45% de aditivo su viscosidad reduce notablemente a 52,72 cst, lo que no ocurre si la temperatura sigue incrementando. Los óptimos porcentajes de demulsificante son entre 10% y 15% por evidenciar una mejor respuesta en la declinación de las curvas de viscosidad, puesto que a porcentajes entre 30% y 45%, inicialmente registra una notable reducción de la viscosidad cinemática, pero al aumentar la temperatura a valores superiores a 40 °C su comportamiento se vuelve constante. La adición del 15% de demulsificante logra una reducción de 107 cst en la viscosidad cinemática.

Tabla 16: Análisis experimental General del "Crudo 2" a diferentes condiciones

17° API										
	0% Demulsificante		10% Demulsificante		15% Demulsificante		30% Demulsificante		45% Demulsificante	
T (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)	Tiempo (s)	Viscosidad (cst)
40	1021	224.44	713	156.61	492	107.87	338	73.83	243	52.72
50	581	127.51	348	76.04	234	50.71	161	34.30	115	23.73
60	317	69.17	179	38.37	122	25.36	87	17.07	77	14.60
70	204	44.00	107	21.86	80	15.35	72	13.34	66	11.79
80	161	34.30	81	15.60	69	12.57	65	11.53	62	10.74
90	134	28.14	71	13.08	65	11.53	63	11.00	59	9.93
100	126	26.29	65	11.53	62	10.74	61	10.47	57	9.38

Elaboración: (López, 2018).

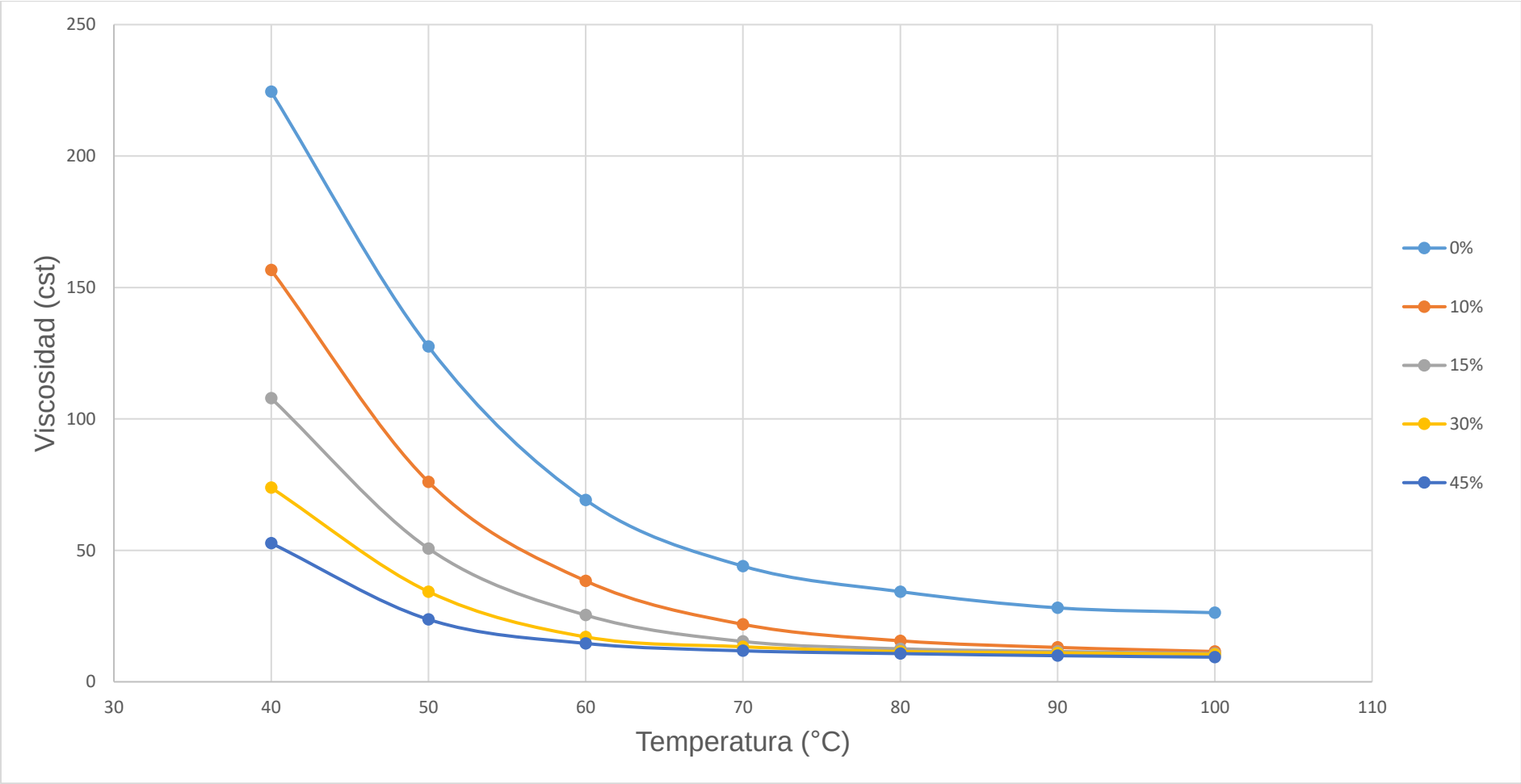

Fig. 30: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del “Crudo 2”
Elaboración: (López, 2018).

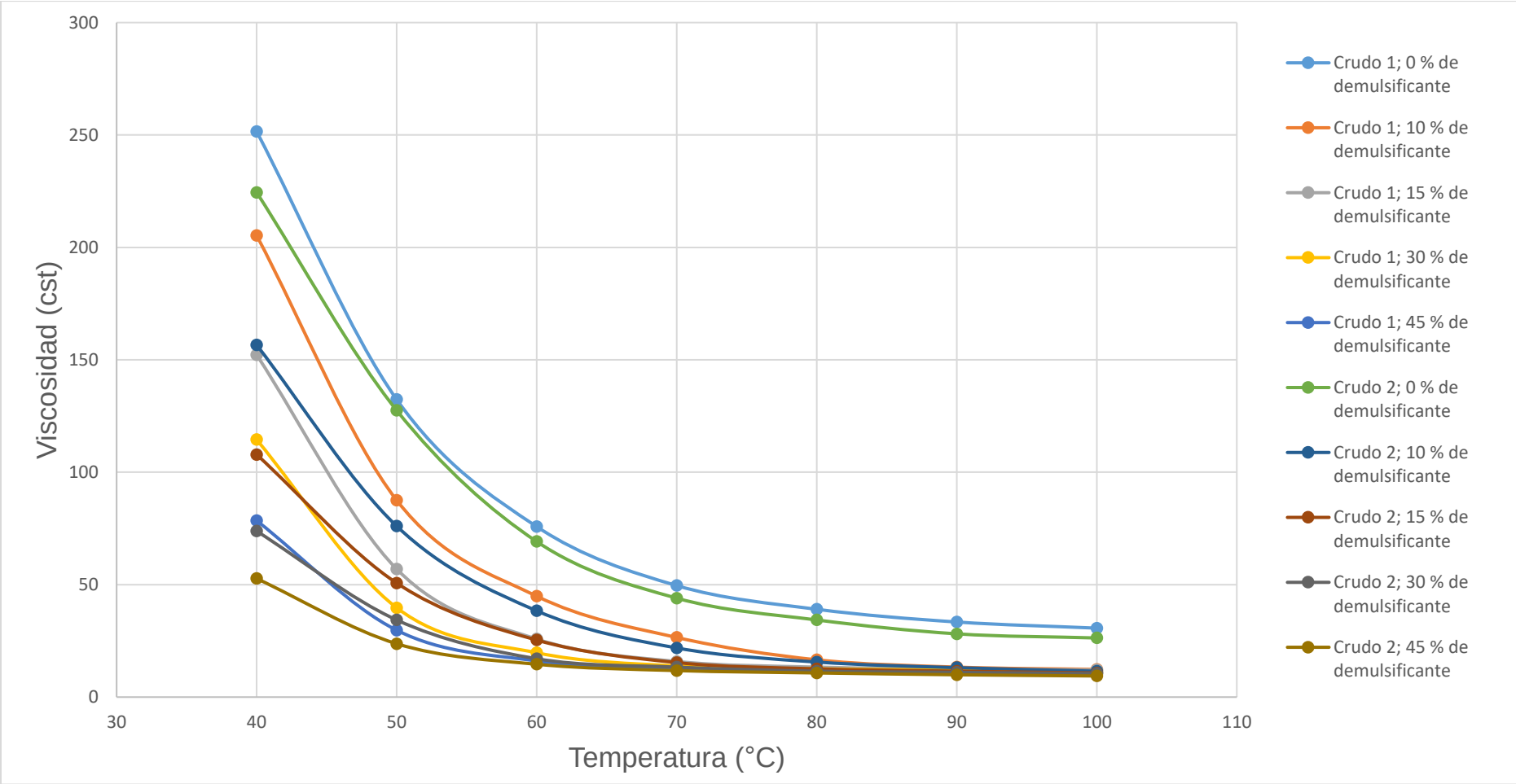

Fig. 31: Curva de Viscosidad Cinemática vs Temperatura del “Crudo 1” y del “Crudo 2” a diferentes condiciones
Elaboración: (López, 2018).

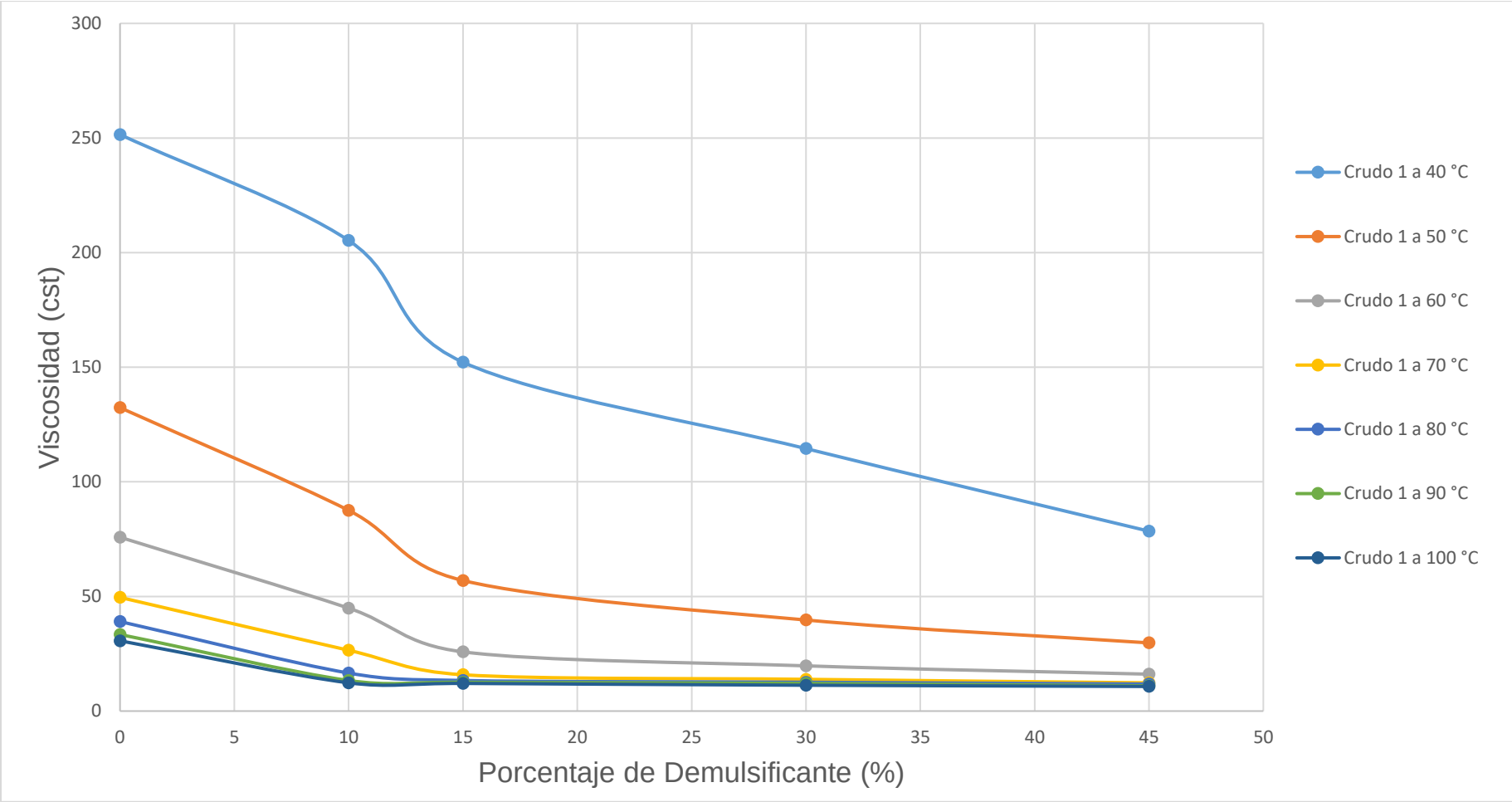

Fig. 32: Curva de Viscosidad Cinemática vs Porcentaje de demulsificante del "Crudo 1" a diferentes condiciones
Elaboración: (López, 2018).

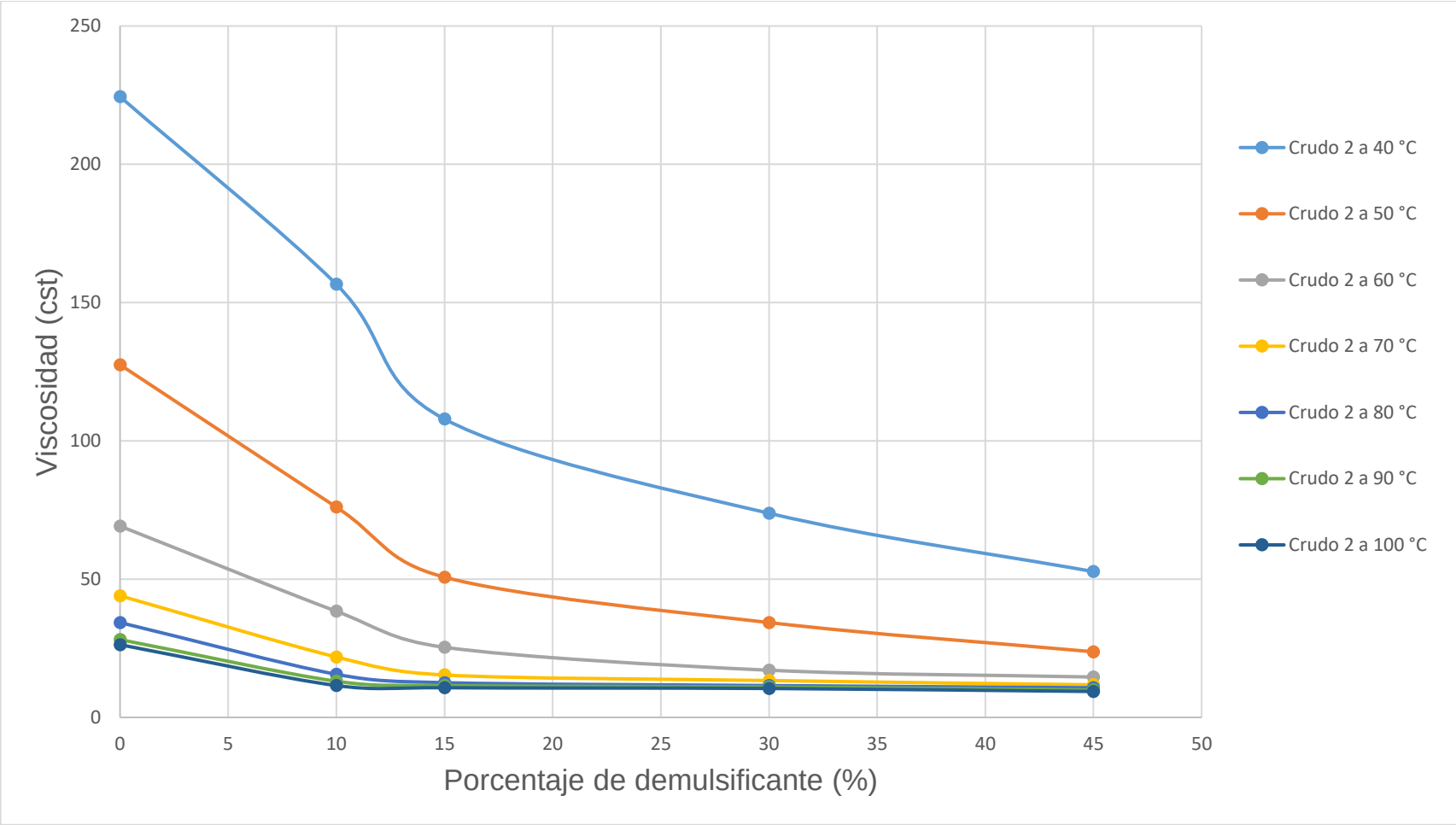

Fig. 33: Curva de Viscosidad Cinemática vs Porcentaje de demulsificante del “Crudo 2” a diferentes condiciones
Elaboración: (López, 2018).

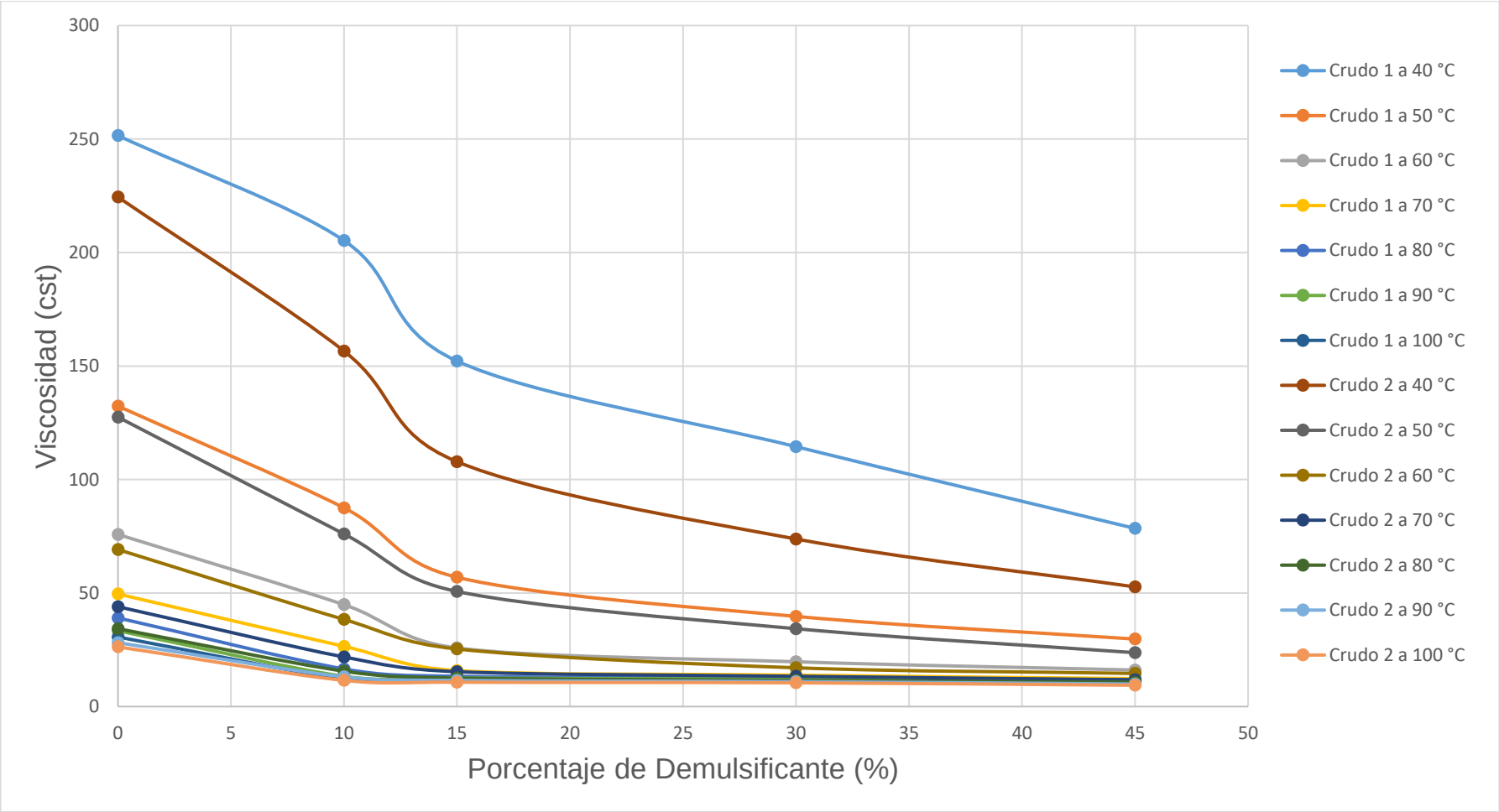

Fig. 34: Curva de Viscosidad Cinemática vs Porcentaje de demulsificante del “Crudo 1” y del “Crudo 2” a diferentes condiciones
Elaboración: (López, 2018).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El estudio de los crudos pesados mediante la variación de temperatura y a diferentes porcentajes de demulsificante registró un decrecimiento exponencial de la viscosidad conforme aumenta la temperatura. Esto indica, que emplear demulsificante para la producción de crudos pesados, presentan resultados favorables antes de implementar procesos con mayor complejidad para la recuperación de estos crudos.
- La adición de un demulsificante aporta a la fluidez del crudo, reduciendo la resistencia. Sin embargo las dosis de este aditivo no deben exceder un límite (50%), puesto que dejaría de ser un estudio factible, tanto técnico como económico en la industria petrolera, se han obtenido mejores resultados si la densidad del crudo es más alta, tal como se empleó para crudos de 16 y 17 °API.
    - Para el crudo 1, “Campo Amo”, la viscosidad óptima sería de 25.83 cst. Se optimiza este valor de viscosidad a una temperatura de 60 °C y un 15 % de demulsificante, debido a que en este punto se da la mayor declinación de la curva sin tener que utilizar mayor porcentaje del aditivo y una mayor temperatura.
    - Para el crudo 2, “Campo Yuralpa”, la viscosidad óptima sería de 25.36 cst. Se optimiza este valor de viscosidad a una temperatura de

60 °C y un 15 % de demulsificante debido a que en este punto hay la mayor declinación de la curva sin tener que utilizar mayor porcentaje del aditivo y una mayor temperatura.

5.2. Recomendaciones

- En el transporte de crudos, especialmente con una densidad elevada, antes de ingresar a la etapa de separación de fluidos, se sugiere implementar este estudio para lograr una adecuada movilidad del crudo.
- Para minimizar costos, es factible la utilización del demulsificante en un rango del 10 al 15%, manteniendo la emulsión a una temperatura de 60 °C, puesto que a temperaturas superiores la variación es mínima, sin registrarse disminuciones considerables en la viscosidad.
- Realizar una mezcla más homogénea de los crudos por medio de una centrifuga, que pueden ser comparados con los resultados obtenidos en esta investigación para establecer si existe una disminución de la viscosidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anguiano, A. (2009). *Metodología para el aseguramiento de flujo decrudopesado.* México.

ASTM, A. (1995). *Standard Test Method for API Gravity for Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method).* American National Standard.

Ballinger and Shugar. (2011). *Chemical Technicians' Ready Reference Handbook.* New York: McGraw-Hill Professional.

Barrios, J. (2011). *Clasificación de los petroleos crudos.*

Bird et al. (1992). *Fenómenos de Transporte.* Barcelona: Editorial Reverte S.A.

Calderon and Vaca. (2013). *Fabricación y experimentación de un viscosimetro Saybolt para la implementacion de un laboratorio de Mecanica.* Ambato.

Calle, L. (2004). *Química y Características del Petroleo y Productos Básicos.* Quito.

Castillo, C. (2014). *Diseño, validación e implementación de un sistema experimental de alta presión y temperatura para medición de viscosidad de aceites crudos con precisión de referencia.* México.

Coba et al. (2013). *Design and construction of a Saybolt viscosimeter and its implementation like a didactic instrument.* Colombia.

Cruz, D. M. (2010). *Estudio teorico-experimental del comportamiento Reologico de crudos pesados.* Mexico D.F.

Dalmati, D., & Pérez, L. (2007). *Propiedades físicas de los fluidos.* Buenos Aires.

Fernandéz, A. (2006). *Preparacion, caracterizacion y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W.* tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada.

Gonzáles, G. (1980). *Explotación de Crudos Pesados.* Bogotá.

Heidemann et al. (1987). *An Introduction to the Properties of Fluids and Solids.*

Industria Petrolera. (2018). *Informe Petrofisico Campo Amo.* Oriente.

Industria Petrolera. (2018). *Informe Petrofisico campo Yuralpa.* Oriente.

Industria Petrolera. (2018). *Informe Petrofísico de demulsificante SR-1123* .

IUPAC. (2012). *Compendium of Chemical Terminology.* IUPAC.

Limón, I. Y. (2014). *Obtencion de parametros petrofisicos y propiedades de fluidos a partir de campo y correlaciones numericas para predecir el comportamiento del yacimiento: estimacion del factor recobro en el campo pacoa.* La Libertad.

Lluch, J. (2008). *Tecnología y Margen del Refino del Petróleo.* Madrid: Diaz Santos S.A.

Machuca and Yépez . (2009). *Diseño, construcción y experimentación de un viscosimetro saybolt y desarrollo de un sistema de control temmperatura en cascada para el laboratorio de fluidos de la facultad de mecanica.* Riobamba.

Mardones and Juanto. (2014). *Laboratorio: Medida de viscosidad.*

Martínez et al. (2011). *Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review, Journal of Petroleum Science and Engineering.*

Martínez, M. (2010). *Formacion y caracterización de emulsiones altamente concentradas de betun en agua.* Universitat de Barcelona, Barcelona.

MathPro. (2011). *Introduccion a la refinacion del petroleo y produccion de gasolina y diesel con contenido ultra bajo de azufre.* Bethesda, Maryland.

Morales, J. (2014). *Estudio del comportamiento reológico de emulsiones de crudos pesados.* Quito.

Peña, M. (2012). *VISCOSÍMETRO CON BASE EN UN PIC18F4550.* Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico, DF.

Porter, M. (1994). *Handbook of surfactants* (2da ed.). (Chapman, & Hall, Edits.)

Quesada, J. (2008). Fluidos viscosos.

Rebolledo and Melania. (2007). *Estudio del efecto de sólidos en la estabilidad de una emulsión de agua en aceite bajo un campo electrico DC.* Caracas.

Rivas et al. (1998). *Natural surfactant with Amines and Ethoxilated Alcohol.*

Rojas et al. (2012). *Fundamentos de reología.* Mérida.

Salager and Marfisi. (2004). *Formulación, composición y fabricación de emulsiones para obtener las propiedades deseadas.* Mérida.

Schukin et al. (1988). *Química coloidal.* Moscú: Steinberg.

Sjöblom et al. (2003). *Our current understanding of water in crude oil emulsions, Advances in Colloid and Interface Science.*

Sociedad Nacional de mineria petroleo y energia. (2007). *Informe quincenal-Hidrocarburos-Clasificacion del Petroleo.*

Zambrano, J. (2014). *Desarrollo de un viscosimetro de hilo vibrante para la caracterizacion termofisica a alta presion de nuevos biocombustibles.* Universidad de Valladolid, Valladolid.

Zéberg and Claus. (2001). *Viscosity Studies for Hydrocarboon Fluids at Reservoir Conditions. Modeling and Measurements.*