



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE  
LOS ACEITES VEGETALES DE: ELAEIS GUINEENSIS (PALMA  
AFRICANA), ELAEIS GUINEENSIS (PALMISTE AFRICANO O  
COQUITO INTEGRAL DE PALMA), JATROPHA CURCAS L (PIÑÓN),  
PRODUCIDOS EN EL ECUADOR.**

**AUTOR: VELÁSQUEZ VALLADARES, ANDRÉS SEBASTIÁN**

**DIRECTOR: MSc. ING. CARRIÓN MATAMOROS, LUIS MIGUEL**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "*DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS ACEITES VEGETALES DE: ELAEIS GUINEENSIS (PALMA AFRICANA), ELAEIS GUINEENSIS (PALMISTE AFRICANO O COQUITO INTEGRAL DE PALMA), JATROPHA CURCAS L (PIÑÓN), PRODUCIDOS EN EL ECUADOR.*", fue realizado por el señor *Velásquez Valladares, Andrés Sebastlán* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí 26 de febrero de 2019

Firma:

Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros, MSc.

C.C 1103574677

C.C 1718980343



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Velásquez Valladares, Andrés Sebastián* declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Determinación del comportamiento reológico de los aceites vegetales *Elaeis Guineensis* (Palma africana), *Elaeis Guineensis* (Palmiste africano o coquito integral de palma), *Jatropha curcas* l (Piñón), producidos en el Ecuador*, es de mi autoría y responsabilidad cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Sangolquí 26 de febrero de 2019**

Firma:

**Sr. Andrés Sebastián Velásquez Valladares**

C.C 1718980343



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

*Yo, Velásquez Valladares, Andrés Sebastián autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación: **Determinación del comportamiento reológico de los aceites vegetales *Elaeis Guineensis* (Palma africana), *Elaeis Guineensis* (Palmiste africano o coquito integral de palma), *Jatropha curcas* l (Piñón), producidos en el Ecuador, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.***

Sangolquí 26 de febrero de 2019

Firma:

**Sr. Andrés Sebastián Velásquez Valladares**

C.C 1718980343

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis, a la Sra. Luz América Almeida Acosta que es la persona que me cuidó y forjó todos estos años. Agradeciéndole profundamente por todo el cuidado tolerancia y comprensión que me ha brindado sin ningún interés personal.

Para mi padre y mi madre en donde estén que se sientan orgullosos de mí, que me he forjado como persona aunque con muchas imperfecciones, pero superando obstáculos a mi manera muy personal.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme vivir y cuidarme todos los días, a mis padres que siempre me cuidaron con su luz.

A mi abuelita que es la persona encargada y la responsable de todos mis logros ya que fue ella m apoyo y sustento todos estos años.

A mi familia y mi hermano que fueron de gran apoyo todos estos años y a mi director de la tesis que me soporto siempre con el desarrollo de esta tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Análisis y definición del problema.....	4
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Alcance.....	6
1.5 Justificación.....	7
<b>CAPITULO II MARCO TEORICO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes investigativos.....	8
2.2 Características generales de las plantas de: Jatropha Curcas L (Piñón), Elaeis Guineensis Jacq (Palma Africana), Elaeis Guineensis Jacq (Palmiste africano o coquito integral de palma).....	9
2.2.1 Generalidades de la Jatropha Curcas L (Piñón) .....	9
2.2.2 Elaeis Guineensis (Palma Africana).....	11
2.2.3 Aceite de Palmiste Africano.....	13
2.5 La reología.....	14

	vii
2.5.1 Evolución de la reología.....	14
2.5.2 Principios e introducción a la reología.....	16
2.5.3 Esfuerzo y deformación .....	16
2.5.4 Viscosidad.....	18
2.6 Clasificación de los Fluidos.....	22
2.6.1 Fluidos Newtonianos.....	23
2.6.2 Fluidos no Newtonianos.....	23
2.7 Modelos reológicos para cada tipos de fluidos.....	27
2.7.1 Ecuación de Newton.....	27
2.7.2 Modelo de Ostwald de Waele o Ley de potencia:.....	27
2.8 Instrumentos para medir la reología.....	28
2.8.1 Accesorios y geometrías del Reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2.....	30
2.8.2 Descripción del funcionamiento del reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2.....	31
2.8.3 Software “Trios” de TA Instruments.....	32
<b>CAPITULO III METODOLOGÍA DE LOS PROCEDIMIENTOS Y EXPERIMENTOS A SER EJECUTADOS EN EL PROYECTO Y COMPARACIÓN DE DATOS.....</b>	<b>33</b>
3.1 Determinación y preparación de muestras.....	33
3.2 Determinación de las geometrías y accesorios, para la elaboración de los ensayos en el reómetro.....	35
3.3 Protocolo de ensayos y condiciones de trabajo para cada experimento a realizar en el reómetro.....	37
3.3.1 Fijar las temperaturas de operación a las cuales se realizaran los experimentos. ...	38
3.3.2 Programación de pruebas sobre el fluido.....	38
3.4 Elaboración de ensayos de flujo estacionario, barrido de temperatura y barrido de amplitud, de los aceites de, Jatropha Curcas L, palma africana y palmiste africano.....	41
3.4.1 Ensayos de flujo estacionario al aceite de piñón, palma y palmiste.....	41
3.4.2 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de piñón, con una temperatura inicial de 10°C y una temperatura final de 110°C.....	53



3.4.2.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de piñón, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C. ....	55
3.4.3 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palma africana, con una temperatura inicial de 1°C y una temperatura final de 110°C. ....	58
3.4.3.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palma africana, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C. ....	60
3.4.4 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palmiste africana, con una temperatura inicial de 10°C y una temperatura final de 110°C. ....	64
3.4.4.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palmiste africana, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C. ....	66
3.4.4.2 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg). ....	69
3.4.4.3 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg). ....	70
3.4.4.4 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 1000 (1/seg). ....	71
3.4.4.5 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 100 (1/seg). ....	72
3.4.4.6 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 10 (1/seg). ....	73
3.4.5 Ensayos de barrido de amplitud al aceite de jatropha, palma y palmiste. ....	74
<b>CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS. ....</b>	<b>85</b>
4.1 Análisis de resultados de los ensayos de flujo estacionario. ....	85
4.1.1 Análisis del flujo estacionario del aceite de jatropha. ....	85
4.1.2 Análisis del flujo estacionario del aceite de palma africana. ....	87

	ix
4.1.3 Análisis del flujo estacionario del aceite de palmiste africana.....	90
4.2 Análisis del ensayo de barrido de temperatura.....	93
4.3 Análisis del barrido de amplitud. ....	94
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>96</b>
5.1 Conclusiones .....	96
5.2 Recomendaciones.....	96
<b>Bibliografía .....</b>	<b>98</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Rango de gradientes de velocidad para distintas aplicaciones industriales.</i> .....	21
<b>Tabla 2.</b> <i>Características de la geometría utilizada y sus parámetros de trabajo, para geometría de cara plana.</i> .....	37
<b>Tabla 3.</b> <i>Características de la geometría utilizada y sus parámetros de trabajo, para geometría de cara inclinada.</i> .....	37
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros operativos para el ensayo de flujo estacionario de los aceites de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en el programación del ensayo.</i> .....	39
<b>Tabla 5.</b> <i>Parámetros operativos para el ensayo de barrido de temperatura del aceite de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en la programación del ensayo.</i> .....	40
<b>Tabla 6.</b> <i>Parámetros operativos para el ensayo de barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en la programación del ensayo.</i> .....	41
<b>Tabla 7.</b> <i>Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 20°C.</i> .....	46
<b>Tabla 8.</b> <i>Esfuerzo de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 50°C.</i> .....	47
<b>Tabla 9.</b> <i>Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 80°C.</i> .....	48
<b>Tabla 10.</b> <i>Esfuerzo de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 80°C.</i> .....	49
<b>Tabla 11.</b> <i>Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 110°C</i> .....	50
<b>Tabla 12.</b> <i>Esfuerzo de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 110°C.</i> .....	51
<b>Tabla 13.</b> <i>Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo.</i> .....	54
<b>Tabla 14.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).</i> .....	56
<b>Tabla 15.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg)</i> .....	57
<b>Tabla 16.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg).</i> .....	57

<b>Tabla 17.</b> <i>Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo.</i> .....	59
<b>Tabla 18.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).</i> .....	61
<b>Tabla 19.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 10000 (1/seg) y a 1000(1/seg).</i> .....	61
<b>Tabla 20.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg).</i> ....	62
<b>Tabla 21.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 100 (1/seg) y a 10(1/seg).</i> .....	62
<b>Tabla 22.</b> <i>Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo del aceite de palmiste.</i> .....	65
<b>Tabla 23.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).</i> .....	67
<b>Tabla 24.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 10000 (1/seg) y a 1000(1/seg).</i> .....	67
<b>Tabla 25.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg)</i> .....	68
<b>Tabla 26.</b> <i>Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 100 (1/seg) y a 10(1/seg).</i> .....	68
<b>Tabla 27.</b> <i>Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de jatropha, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 600 rad/seg.</i> .....	77
<b>Tabla 28.</b> <i>Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de palma, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 100 rad/seg.</i> .....	80
<b>Tabla 29.</b> <i>Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de jatropha, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 10 rad/seg.</i> .....	84
<b>Tabla 30.</b> <i>Rango de gradientes de velocidad para distintas aplicaciones industriales.</i> .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Cantidades de cada componente de los racimos de palma africana. ....	3
<b>Figura 2.</b> Frutos de la <i>Jatropha Curcas</i> L. ....	10
<b>Figura 3.</b> Frutos de la <i>Jatropha Curcas</i> L. ....	10
<b>Figura 4.</b> Semillas de Piñón. ....	11
<b>Figura 5.</b> Distribución de plantaciones de palma africana en el Ecuador. ....	12
<b>Figura 6.</b> Racimo y fruta de palma africana. ....	12
<b>Figura 7.</b> Productos y sub productos obtenidos del procesamiento del fruto de palma africana .....	13
<b>Figura 8.</b> Evolución histórica de la reología. ....	16
<b>Figura 9.</b> Ejemplos de deformaciones .....	17
<b>Figura 10.</b> Curva de fluidez, viscosidad dinámica y aparente.....	18
<b>Figura 11.</b> Esfuerzo de corte vs velocidad de corte. ....	22
<b>Figura 12.</b> Gráfica de esfuerzo de cizalla vs velocidad de deformación para fluidos independientes del tiempo. ....	25
<b>Figura 13.</b> Gráfica del comportamiento de la viscosidad para fluidos dependientes del tiempo. ....	26
<b>Figura 14.</b> Esfuerzo de cizalla vs velocidad de deformación, para fluidos tixotrópicos y fluidos reopéticos.....	26
<b>Figura 15.</b> Clasificación de los fluidos, con sus respectivos modelos reológicos.....	28
<b>Figura 16.</b> Discovery Hybrid Rheometer HR-2 .....	29
<b>Figura 17.</b> Especificaciones técnicas del reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2 .....	29
<b>Figura 18.</b> Plato Peltier.....	30
<b>Figura 19.</b> Geometría de cara plana con 40 mm de diámetro y 2 ° de inclinación.....	31
<b>Figura 20.</b> Aceite de <i>Jatropha</i> .....	33
<b>Figura 21.</b> Aceite de palma africana. ....	34
<b>Figura 22.</b> Aceite de palmiste africano. ....	34
<b>Figura 23.</b> Flujo estacionario del aceite de <i>jatropha</i> y palma a 10°C. (Viscosidad).....	41
<b>Figura 24.</b> Flujo estacionario del aceite de <i>jatropha</i> y palma a 10°C. (Esfuerzo). ....	42

<b>Figura 25.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 20°C. (Viscosidad). ....	43
<b>Figura 26.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 20°C. (Esfuerzo).....	44
<b>Figura 27.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 50°C. (Viscosidad) .....	45
<b>Figura 28.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 50°C. (Esfuerzo).....	46
<b>Figura 29.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 80°C. (Viscosidad). ....	47
<b>Figura 30.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 80°C. ....	48
<b>Figura 31.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 110°C. (Viscosidad).....	49
<b>Figura 32.</b> Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 110°C. (Esfuerzo).....	50
<b>Figura 33.</b> Variación del comportamiento del aceite de jatropha en los ensayos de barrido de temperatura (10°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla. ....	53
<b>Figura 34.</b> Variación del comportamiento del aceite de jatropha en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla. ....	55
<b>Figura 35.</b> Variación del comportamiento del aceite de palma en los ensayos de barrido de temperatura (1°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla. ....	58
<b>Figura 36.</b> Variación del comportamiento del aceite de palma en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla. ....	60
<b>Figura 37.</b> Variación del comportamiento del aceite de palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (20°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.....	64
<b>Figura 38.</b> Variación del comportamiento del aceite de palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.....	66
<b>Figura 39.</b> Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 49000 (1/seg).....	69
<b>Figura 40.</b> Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 10000 (1/seg).....	70
<b>Figura 41.</b> Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 1000 (1/seg).....	71

<b>Figura 42.</b> Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 100 (1/seg).....	72
<b>Figura 43.</b> Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 10 (1/seg).....	73
<b>Figura 44.</b> Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 600 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C).....	75
<b>Figura 45.</b> Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de almacenamiento.....	78
<b>Figura 46.</b> Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de pérdida. ....	79
<b>Figura 47.</b> Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 10 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de almacenamiento.....	82
<b>Figura 48.</b> Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 10 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de pérdida. ....	83
<b>Figura 49.</b> Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de jatropha a diferentes temperaturas. ....	86
<b>Figura 50.</b> Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de jatropha a diferentes temperaturas.....	87
<b>Figura 51.</b> Grafica del esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palma a 20°C y 50°C de temperatura. ....	88
<b>Figura 52.</b> Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palma a 20°C y 50°C de temperatura. ....	88
<b>Figura 53.</b> Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palma a diferentes temperaturas. ....	89
<b>Figura 54.</b> Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palma a diferentes temperaturas. ....	90

<b>Figura 55.</b> Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palmiste a diferentes temperaturas. ....	91
<b>Figura 56.</b> Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palmiste a diferentes temperaturas.....	91
<b>Figura 57.</b> Viscosidades de algunos materiales.....	93



## RESUMEN

El presente proyecto investigativo, consiste en la determinación del comportamiento reológico de tres aceites vegetales que se producen en el Ecuador, como son: el aceite de piñón de palma africana y de palmiste africano. Estos aceites serán sometidos a diferentes condiciones de operación. Esto se logrará mediante la variación de diferentes parámetros de trabajo como; velocidades de cizalla, temperaturas, porcentajes de deformación, frecuencias angulares. Mediante la planificación y elaboración de diferentes ensayos que abarquen una variedad de parámetros operacionales se lograra esclarecer cuál es el comportamiento reológico del aceite y determinar que aplicaciones se pueden alcanzar con el uso de los aceites en cuestión. También permite conocer las limitaciones que los aceites de palma, jatropha y palmiste pueden presentar en aplicaciones industriales. Desarrollar nuevos materiales que contribuyan al desarrollo tecnológico, productivo y económico del Ecuador es la misión y la meta de las nuevas generaciones de ingenieros en el país. Para alcanzar esta ambiciosa apuesta se tiene que recurrir a los productos que el Ecuador puede producir en masa como país tercermundista. Entre estos productos se encuentran las materias primas vegetales, animales y algunas minerales. Este proyecto investigativo se realiza para esclarecer determinar el comportamiento reológico de aceites que se están usando en el desarrollo de nuevas tecnologías.

### **Palabras claves:**

- **REOLOGÍA**
- **ACEITE**
- **VISCOSIDAD**
- **ESFUERZO**

## ABSTRACT

The current investigation determines three rheologic behavior of the vegetable oils which are produced in Ecuador, such as pine oil or jatropha, African palm and African palm kernel oil. These oils will be processed to different operative conditions. This will be gotten through the variation of different work parameters such as: speeds of shears, temperatures, deformation percentages and angular frequencies. Through planning and making different essays including a variety of operation parameters it will be possible to define the rheologic behavior of the oil and also to determine the applications that can be reached with the use of such oils. It also allows to know the limitations that palm, jatropha and palm kernel oils can present in industrial applications. Developing new materials that contribute to the technological, productive and economic development of Ecuador is the mission and goal of the new generations of engineers in the country. In order to achieve this ambitious commitment, we must resort to the products that Ecuador can mass produce as a Third World country. Among these products is the raw vegetable, animal and some mineral metrics. This research project is carried out to clarify and determine the rheological behavior of the oils that are being used in the development of new technologies.

### **Keywords:**

- **REOLOGY**
- **OIL**
- **VISCOSITY**

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 Antecedentes

Una de las principales prioridades del gobierno ecuatoriano, es el desarrollo de la innovación y de la matriz productiva, a base de la inversión, investigación y la educación.

El sub desarrollo, el abandono de las diferentes políticas de estado, han desencadenado que este país posea muchos retrasos tecnológicos además de la falta de industrialización.

Hasta lograr un desarrollo tecnológico de primera calidad en nuestro país es de suma importancia reconocer que como país primario exportador existe materia prima agrícola que se puede transformar en una fuente tecnológica y que con un debido estudio y análisis puede convertirse en un recurso financiero.

#### **Jatropha Curcas L (Piñón).**

La Jatropha es una planta de alta resistencia a climas secos y suelos de poca fertilidad, su cultivo se desarrolla en la costa ecuatoriana y puede llegar a suelos de 1500 metros sobre el nivel del mar, por esta razón es de suma importancia su análisis. Ya que su producción estaría orientada a terrenos estériles, secos y con poca lluvia. De poco valor económico y agrario por su ubicación y condiciones geográficas.

El aceite de jatropha es el producto a ser analizado, este aceite se obtiene del proceso de extracción de sus semillas, que aproximadamente es el 30% de la masa de la semilla lo demás se convierte en desecho.

La acogida y la difusión de esta planta y de su aceite se desarrollan en base a estudios realizados en otros países, generalmente los países de la región de Centroamérica. En estos países

el diferente desarrollo de estas tecnologías agrarias ha posicionado al aceite de jatropha como la materia prima de muchos sub productos.

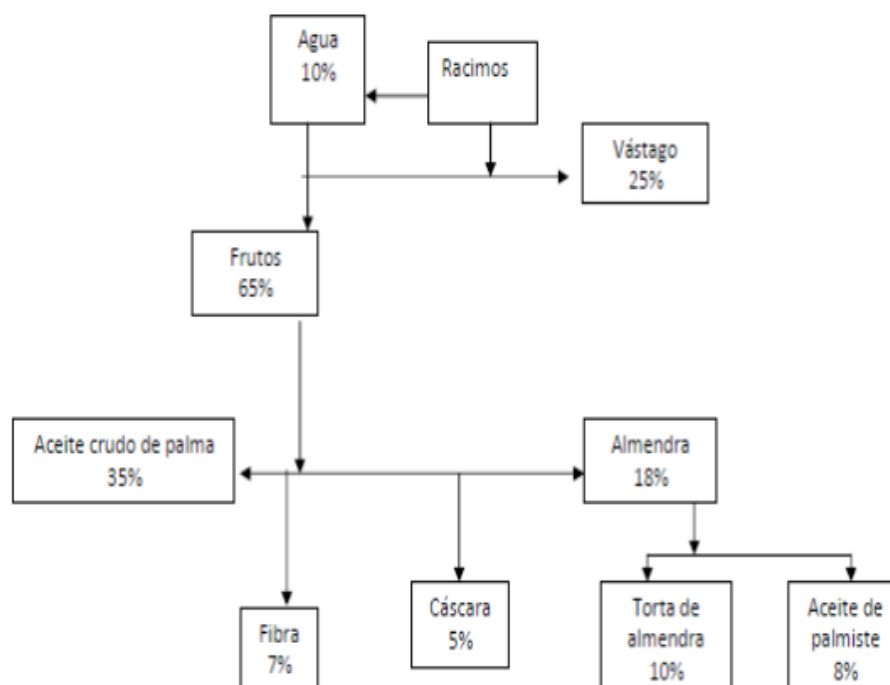
Actualmente, en el Ecuador se está empezando la siembra, cultivo y cosecha, mayormente en la provincia de Manabí, ya que ésta provincia en líneas generales presenta las condiciones más apropiadas geográficas y climáticas con terrenos de suelos áridos y días muy soleados.

### **Palmiste africano o coquito integral de palma**

Cuando la semilla de palma africana es sometida a procesos industriales para obtener sus productos derivados, en una primera fase se obtiene tres tipos de productos comerciales: el aceite crudo de palma, el aceite de palmiste y la torta de palmiste.

El aceite de palmiste africano, representa alrededor de un 5% del peso total del racimo. De una semilla de la planta de la palma africana se obtiene 35% de aceite crudo de palma, y tan solo un 8% de palmiste. (Zumbado, Madrigal, & Marín, 1992)

Una ventaja de la producción de este aceite es el tiempo y economía ya que se obtiene al mismo tiempo que se extrae el aceite de palma por esta razón es de suma importancia estudiar las condiciones reológicas de este aceite. Una desventaja es la cantidad de este aceite que se produce, es casi 5 veces inferior al aceite de palma.



**Figura 1.** Cantidades de cada componente de los racimos de palma africana.  
Fuente: Aguilera (2002); Días et al. (2003).

### **Palma Africana.**

En la actualidad, la comercialización del aceite de palma genera que este cultivo sea uno de los negocios agrarios más productivos del país. Se cultiva principalmente en la costa y oriente ecuatoriano.

El aceite de palma es obtenido de la extracción y procesamiento de sus frutos, este se utiliza en la industria alimenticia para hacer manteca vegetal y en general productos para la gastronomía en general.

Como indica Ministerio de Agricultura (2013)

Debido a la creciente demanda, la producción mundial de aceite de palma africana, entre el año 2000 al 2012, registró un crecimiento de 141%, pasando de 22 millones de toneladas producidas en el año 2000 a 54 millones de toneladas en el 2012. Ecuador es sexto productor de palma a nivel mundial. Desde el año 2000 al 2012, la producción nacional de palma africana en el Ecuador aumentó en 114%

Este dato estadístico indica la importancia y el crecimiento de los cultivos de palma africana en el Ecuador.

El gobierno ecuatoriano, ha generado proyectos pilotos en base a la utilización de aceites vegetales. Principalmente se emplean los aceites de palma africana y el aceite de jatropha.

ERGL (Energías renovables para Galápagos) es un proyecto que se ha iniciado como un Plan Piloto en la Isla Puná, para extenderse posteriormente a las Islas Galápagos para continuar con el aporte a la iniciativa "Cero combustibles fósiles para las Islas Galápagos". Cuyo objetivo es reemplazar el combustible diésel que utilizan los motores de combustión interna por aceite vegetal, para generación de energía eléctrica, lo que permitirá alcanzar beneficios ambientales y se podría convertir en una alternativa energética del Ecuador.

El 30 de diciembre de 2008, CELEC TERMOPICHINCHA, realizó pruebas de un motor de combustión interna de 2.000 kW utilizando como combustible aceite de piñón en sustitución del diésel. Si bien el rendimiento energético al utilizar aceite de piñón disminuyó de 11,8 a 10,3 kWh/gal que corresponde a un descenso del 12,7 % con relación al del diésel debido al menor poder calórico del aceite, el objetivo de producir menos emisiones de gases a la atmósfera se logró.

En esta iniciativa intervienen empresas nacionales e internacionales como por ejemplo; CELEC TERMOPICHINCHA, INIAP, MEER (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables), Federación Alemana de medio ambiente, etc.

## **1.2 Análisis y definición del problema.**

Cualquier tecnología en proceso de desarrollo debe seguir un régimen de pruebas y comprobaciones, con un análisis técnico y científico que sirva de respaldo.

El Ecuador está pretendiendo utilizar aceites vegetales como emulsiones para disminuir la contaminación ambiental que existe con el uso de combustibles fósiles, en regiones o sitios geográficos que posean una valiosa fauna y flora.

Para alcanzar este objetivo no basta con realizar pruebas de “error”, ni tampoco confiar ciegamente en estudios procedentes de otros países u otros investigadores. Si el Ecuador pretende a futuro ser un país que desarrolle tecnología debe realizar una investigación con las exigencias de confiabilidad dignas de un país en desarrollo y desarrollar correctamente su tecnología.

Para determinar el uso adecuado de aceites vegetales en diferentes aplicaciones industriales es importante analizar todas y cada una de las propiedades de los aceites para poder tener un sustento teórico que abarque el desarrollo práctico a implementar.

Uno de los primeros pasos que se determinan para el estudio del comportamiento de un fluido es el estudio de la reología.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Determinación del comportamiento reológico de los aceites vegetales de: *Elaeis Guineensis* (Palma Africana), *Elaeis Guineensis* (Palmiste africano o Coquito integral de Palma), *Jatropha Curcas L* (Piñón), producidos en el Ecuador.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar el comportamiento reológico de los diferentes aceites vegetales producidos en el Ecuador variando diferentes parámetros como: temperatura, velocidad de cizallamiento, frecuencias y porcentajes de deformación.

- Establecer y determinar, las principales condiciones y características propias de los aceites a ser analizados, tales como: viscosidad, tipo de fluido, consistencia, comportamientos a diferentes condiciones de operación, etc.
- Establecer datos investigativos que delimiten parámetros técnicos a los cuales los aceites analizados posean un comportamiento estable y funcional.

#### **1.4 Alcance.**

El presente proyecto tiene como alcance caracterizar el comportamiento reológico de los aceites vegetales de: *Elaeis Guineensis* (Palma Africana), *Elaeis Guineensis* (Palmiste africano o Coquito integral de Palma), *Jatropha Curcas L* (Piñón), producidos en el Ecuador.

Estos aceites serán sometidos a diferentes condiciones de trabajo mediante la variación de parámetros como:

- Temperatura de operación.
- Velocidad de cizallamiento.
- Frecuencia.
- Porcentaje de deformación.

Los aceites vegetales de: palmiste, palma y jatropha serán estudiados y analizados para determinar sus características y comportamiento como fluidos y en que rangos operativos son aptos para ser implementados en un proceso o producto industrial.

Serán analizados en el reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2, máquina ubicada en el laboratorio de mecánica de fluidos, esta máquina cumple con todos los requisitos para someter a los aceites a diferentes condiciones y régimen de trabajo, simulando condiciones parecidas a las que se estima tenga un fluido en aplicaciones industriales.



Después de los ensayos y pruebas correspondientes, con los diferentes datos obtenidos se procederá a analizar los resultados, para tener una base de datos investigativos que sirvan como parámetros reológicos

### **1.5 Justificación**

El Ecuador es un país de con muchos recursos naturales y mucha producción agrícola, es de suma importancia investigar las características reológicas de los aceites con mayor factibilidad de ser producidos en este país y los aceites vegetales que ya se están implementando en proyectos industriales (como biocombustibles), por dos razones muy importantes.

- El desarrollo de biocombustibles, es un proceso investigativo complejo y largo, en el cual se necesita desarrollar varios parámetros y características en muchos de los fluidos a analizar, y una de ellas es determinar el comportamiento reológico de estos aceites, para que en posteriores investigaciones ya se tenga esclarecido el comportamiento del fluido a diferentes condiciones de operación.
- Un aporte a la investigación que sirva para el al cambio de la matriz productiva y para el desarrollo de nuevas tendencias en productos que el Ecuador puede producir y generan a grandes escalas.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### **2.1 Antecedentes investigativos.**

La tendencia del Ecuador es la de generar un desarrollo en el cambio de la matriz productiva. La generación de nuevas tecnologías que con lleven al desarrollo económico, social y cultural es la nueva perspectiva que se refleja en el estado ecuatoriano, mediante la ejecución de mega proyectos, mega construcciones, becas en el extranjero para pregrado y doctorado, escuelas del milenio, etc.

Para una producción nacional es esencial analizar las materias primas que se pueden ser explotadas con mayor facilidad, a gran escala y que generen menos daños colaterales, cuando se genere la explotación de estas.

Una de estas materias primas son los aceites vegetales. Estudiar las características de los principales aceites que se pueden producir en el Ecuador, para determinar la factibilidad que existe de que un aceite vegetal pueda ser empleado en otra industria que no sea la alimenticia, es una buena iniciativa para el desarrollo tecnológico.

Pero este proceso no es tan sencillo ya que se debe comprobar varios aspectos, entre los más destacados tenemos:

- La planta vegetal de la cual se extrae el aceite, se produzca en la región a una escala considerable y sea de fácil acceso para su procesamiento
- Factibilidad de extracción del aceite vegetal de la semilla, fruto o cualquier parte de la planta de donde proviene este.
- La importancia de sembrío, cosecha y producción de la planta para el sector.

- Costos relacionados a la obtención, refinación, filtrado y todos los pasos necesarios para que el aceite pueda ser utilizado como combustible en la industria.
- Determinar el comportamiento del fluido en las diferentes condiciones de trabajo. (Reología de los aceites).
- Análisis de las características químicas del aceite.
- Estudio del mercado a ser implementado el uso del aceite.

Como la determinación de todos estos parámetros es muy extensa para un proyecto investigativo de corto alcance como este, para el presente trabajo lo que se desea es determinar el comportamiento reológico de tres aceites producidos en el Ecuador, que por diferentes motivos y características propias de estos, en un futuro pueden llegar a ser aceites vegetales que funciones como aceites vegetales combustibles o puedan formar parte de emulsiones de diésel (DOE), o cumplir con otras funciones industriales.

## **2.2 Características generales de las plantas de: *Jatropha Curcas* L (Piñón), *Elaeis Guineensis* Jacq (Palma Africana), *Elaeis Guineensis* Jacq (Palmiste africano o coquito integral de palma).**

### **2.2.1 Generalidades de la *Jatropha Curcas* L (Piñón)**

La *Jatropha Curcas* L común mente conocido como Piñón, es una planta considerada silvestre. Su auge como planta de sembrío y cosecha productiva, es relativamente reciente por esta razón no existen suficientes investigaciones ni desarrollo de prácticas para el manejo y establecimiento de plantaciones que puedan ser aplicadas universalmente.

La *Jatropha* se dio a conocer, por dos razones; es conocida como un cultivo energético, ya que estudios y pruebas han concluido que su aceite es considerado un biocombustible. Otra importante razón es la facilidad de las condiciones geográficas y climáticas que necesita para

desarrollarse como cultivo. Se puede adaptar a condiciones agroecológicas adversas (resistente a la sequía, tierras de baja fertilidad, y a altas temperaturas), el Piñón se convierte en una opción para una producción sustentable. Ya que en este tipo de condiciones mucha vegetación no logra sobrevivir quedando estos suelos invitados, con poco uso comercial y valor económico.

<b>Condiciones agroecológicas ideales para el cultivo de piñón</b>	
Pluviometría:	800 a 1,200 milímetros (mm) anuales, bien distribuidos
Estación seca:	3 – 6 meses
Altitud:	0 – 800 m sobre el nivel del mar (msnm)
Temperatura:	25 a 35 grados centígrados (°C)
Vientos:	Leves a moderados
Fotoperiodo:	Días con buena iluminación solar
Suelos:	Bien drenados – arenosos. Tolera suelos infértiles
Textura de los suelos:	Mediana a liviana
Drenaje:	Muy bueno
Topografía:	Plana a ondulada: tecnificado, usando maquinaria. Laderas: ideales para el cultivo, pero aplica mejor para pequeñas plantaciones que no requieren uso de maquinaria.

**Figura 2.** Frutos de la *Jatropha Curcas* L.

Fuente: (Guía técnica – ambiental para el cultivo de la *Jatropha Curcas* (Piñón))



**Figura 3.** Frutos de la *Jatropha Curcas* L.

Fuente: (<http://studylib.es/doc/investigaciones>)

### 2.2.1.2 Morfología de la *Jatropha*.

De cada fruto de la *Jatropha*, se obtiene normalmente 3 semillas, el aceite que se obtiene de la trituración de estas, es el aceite vegetal de la *Jatropha*. El fruto necesita aproximadamente 90 días para que se desarrolle desde la floración hasta que madura la semilla.



**Figura 4.** Semillas de Piñón.

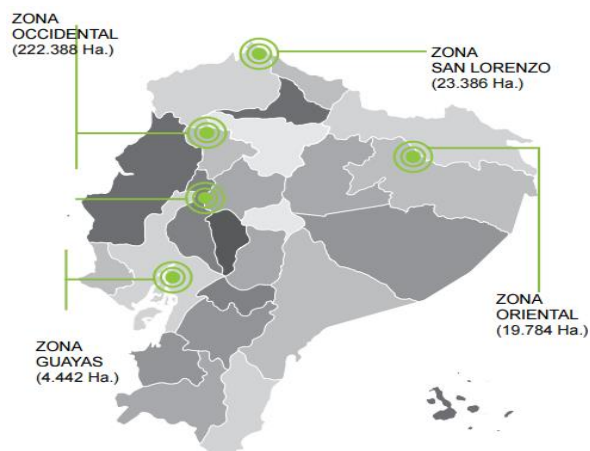
Fuente: (Semilla de Piñón, disponible en <http://huagra.blogspot.com/2009>)

De la semilla del piñón aproximadamente el 67% pertenece a la torta, en relación con el peso total de la semilla presentada, lo demás que estaría entre el 32% es el aceite de *Jatropha*.

### 2.2.2 *Elaeis Guineensis* (Palma Africana).

Esta planta es originaria de África ecuatorial occidental, su migración es producida en América alrededor del siglo XIX traída en las embarcaciones de los colonos europeos.

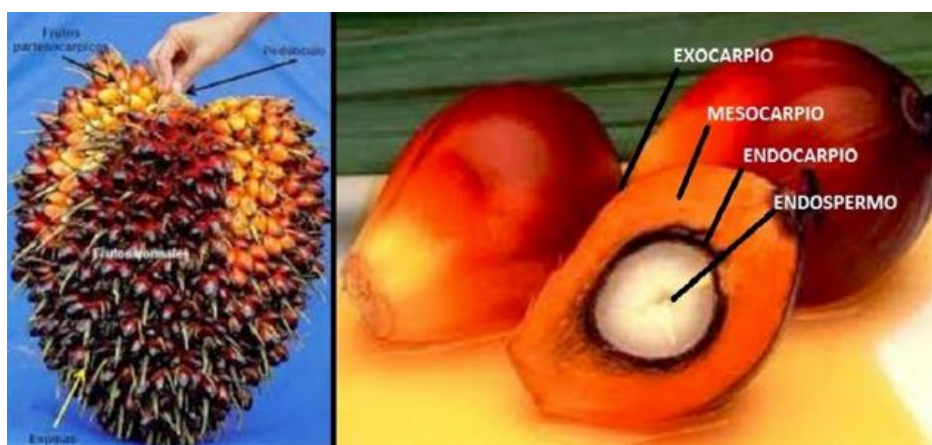
La palma africana es una planta propia de climas tropicales, entre 24°C y 26°C, como temperatura promedio, la planta necesita como mínimo 5 horas de radiación solar al día, con una humedad relativa superior al 75%. (IICA, 1983)



**Figura 5.** Distribución de plantaciones de palma africana en el Ecuador.  
Fuente: (ANCUPA-FEDEPL/MAGAP, 2005)

### 2.2.2.2 Morfología de la palma africana.

Sus frutos, están dispersos en racimos, un racimo carga un rango de frutos que varía entre los 1200 a 1500 frutos. Su forma general mente varia de casi esférica a ovoide alargado con una longitud que varía desde los 2 cm hasta los 5 cm, de color verdoso o negro rojizo en su parte superior y de color amarillo en la parte inferior. El fruto contiene el 50% y 45% de su peso en aceite, un 20% a 15% de fibras y solubilizadas en agua, azúcares, sales, materias pépticas, albúminas. (IICA, 1983)

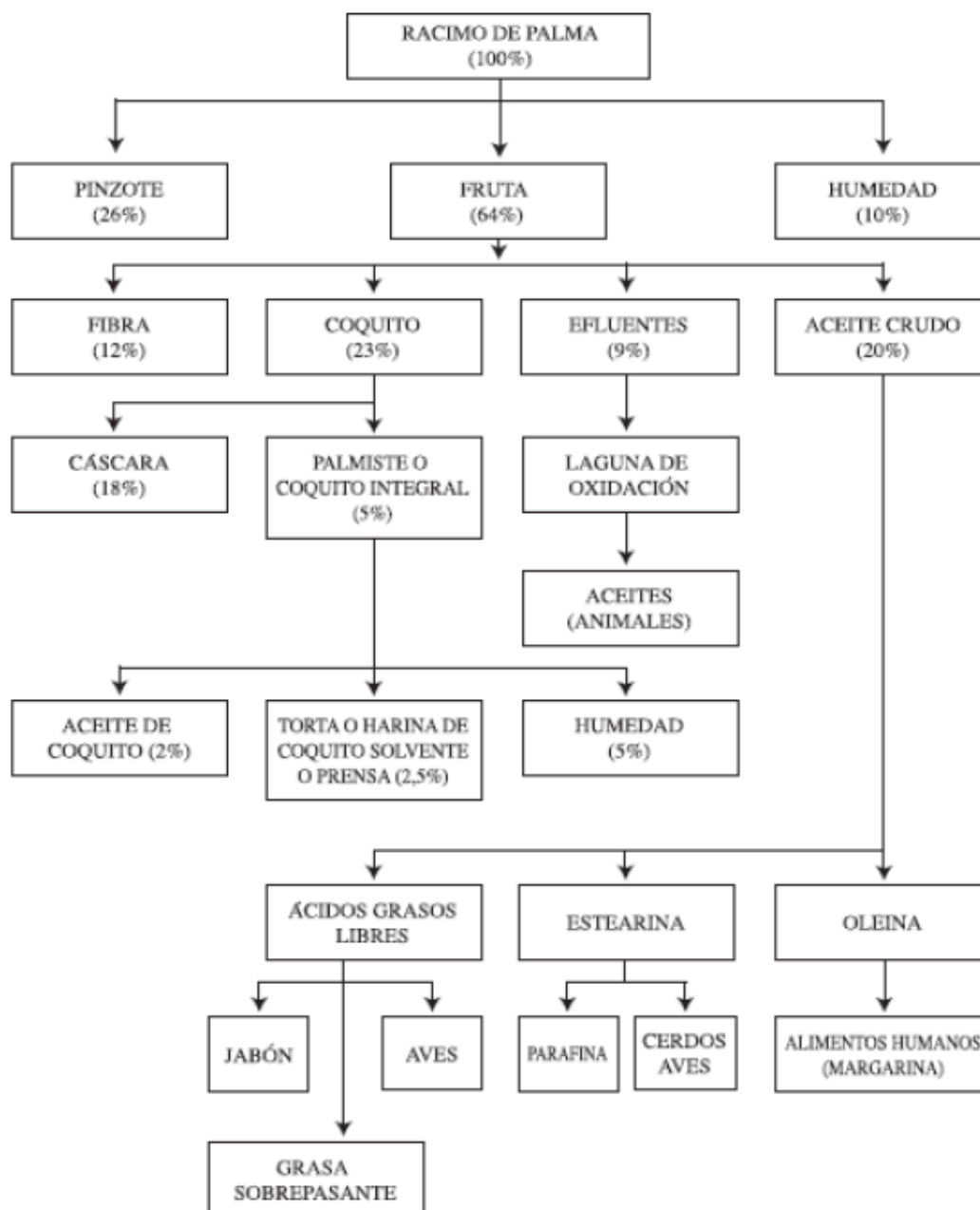


**Figura 6.** Racimo y fruta de palma africana.  
Fuente: (Adaptado por el autor desde: Pamicultura Agrícola).

### 2.2.3 Aceite de Palmiste Africano

El aceite de palmiste africano es un sub producto del proceso de extracción de la semilla de palma africana, el cual solo se encuentra en las fibras que conforman el endospermo o almendra.

Este aceite constituye alrededor del 44%, en peso de la almendra de la fruta de palma.



**Figura 7.** Productos y sub productos obtenidos del procesamiento del fruto de palma africana

Fuente: (Vargas y zumbado 2003).

## 2.5 La reología.

### 2.5.1 Evolución de la reología.

La reología tiene su origen en 1929, para el estudio y entendimiento, de la deformación o flujo de la materia, de fluidos que no se comportan netamente como sólidos ni líquidos.

El estudio de la reología inicia en el año de 1678 Robert Hooke se convierte en el primer científico que nombra la reología. “Si se dobla la tensión se dobla la deformación”.

Hooke describió la relación existente entre esfuerzo y deformación en sólidos elásticos.

$$\sigma = G * \gamma$$

Siendo:  $\sigma$ : Esfuerzo Cortante (Pa)

$G$ : Modulo de rigidez (Pa)

$\gamma$ : Deformación (%).

Esta fórmula enuncia que si se aplica una carga  $\sigma$  sobre un cuerpo sólido, este va a sufrir una deformación  $\gamma$

Pero nueve años después una hipótesis relacionada al estado simple de corte o cizalladura es publicada por Isaac Newton.

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$

Siendo:  $\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\mu$  = Constante de proporcionalidad “Viscosidad Newtoniana”

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación de cizallamiento.

Describiendo que al aplicar un esfuerzo cortante a un fluido este es igual a la viscosidad del fluido por la velocidad de deformación de la fuerza aplicada. Con esto plantea la ley de viscosidad de los fluidos.



En épocas posteriores a estas formulaciones se aplicaba la ley de Hooke para el estudio de sólidos, y la ley de Newton para líquidos, pero a partir del siglo XIX científicos empezaron a dudar sobre la universalidad de estas dos leyes lineales.

James Clerk Maxwell describe un modelo matemático para describir a los fluidos que describan respuesta de un sólido en otras palabras que poseen propiedades elásticas.

$$\sigma = \beta * \gamma$$

Siendo:  $\sigma$ : Esfuerzo Cortante (Pa)

$\beta$ : Parámetro semejante al módulo de rigidez (Pa)

$\gamma$ : Deformación (%).

Los resultados, tanto del experimento de W. Weber para sólidos y J. C. Maxwell para líquidos, tenían un comportamiento similar, que posterior mente se denominaría “Viscoelasticidad”.

Época	Clase de fluidos/modelos		Trabajos representativos
Antigüedad - s.XVII s. XVIII	Material Ideal	Cuerpo rígido	Arquímedes, Newton (1687),
		Sólido elástico	Hooke (1678), Young (1807)
Fluido de Pascal		Pascal (1663), Bernouilli (1738), Euler (1755)	
Líquido newtoniano		Newton (1687), Navier (1823), Stokes (1845), Hagen (1839), Poiseuille (1841)	
Mediados s.XIX	Viscoelasticidad lineal	Teoría tridimensional para describir líquidos newtonianos	Navier-Stokes
		Experimentos con hilos de seda (Elementos asociados a la respuesta de un líquido)	W.Weber (1835),
		Elementos asociados a la respuesta de un sólido	J.C. Maxwell (1867)
		Viscoelasticidad lineal	Poynting & Thomson (1902)
s.XIX - s.XX	Líquidos newtonianos generalizados		Trouton & Andrews (1904), Bingham (1922), Ostwald (1925), De Waele (1923), Herschel-Bulkley (1926)
<b>1929</b>	<b>Nacimiento de la Reología</b>		<b>Bingham, Reiner y otros</b>
s.XX		Viscoelasticidad no lineal	Poynting (1913), Zaremba (1903), Jaumann (1905), Hencky (1929)
		Número de Deborah, De	M. Reiner (1945)
		Modelos que describen la curva de flujo general	Sisko (1958), Cross (1965), Carreau (1972)
	Descripción clave de materiales	Suspensiones Newtonianas	Einstein (1906), Krieger-Dougherty (1959), Quemada (1982), De Kruif(1982),Barnes (1981), Farris ((1968),
		Suspensiones no Newtonianas	Krieger (1972)
		Polímeros	Baekeland (1909), Staudinger(1920)
	Viscosidad extensional	Trouton (1906), Tamman & Jenckel (1930)	

**Figura 8.** Evolución histórica de la reología.

Fuente: (Ramírez N., Juan Sebastián, Introducción a la reología de los alimentos, 2006).

## 2.5.2 Principios e introducción a la reología.

La reología estudia la aplicación de diferentes tipos de esfuerzos externos y la deformación, en todos los materiales que son capaces de fluir. Describiendo y relacionando las fuerzas, esfuerzos deformaciones y tiempo, teniendo una aplicabilidad a todos materiales; gases, líquidos y sólidos.

Para el estudio y entendimiento de la reología se debe tener claro las propiedades de los materiales que tienden a fluir, además de las condiciones de trabajo y los parámetros físicos que rigen al fluido.

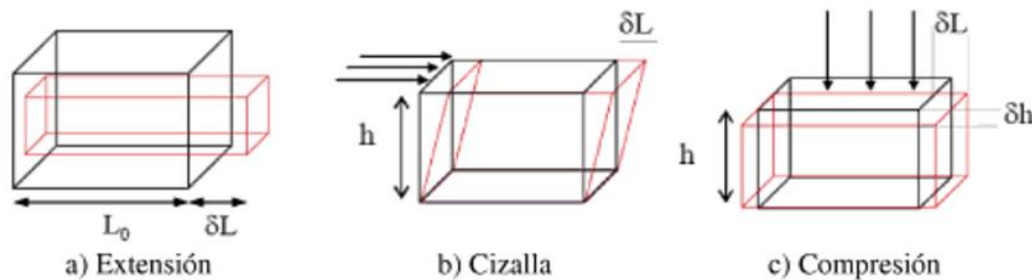
## 2.5.3 Esfuerzo y deformación

Según Ramírez N. (2006) “La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o

la ocurrencia de dilatación térmica”, hay que recalcar que existen dos tipos de deformaciones, la deformación plástica y elástica, que es aplicable para todos los materiales existentes

El esfuerzo está definido como una fuerza por unidad de área y usualmente expresado en (Pa), la aplicación de diferentes tipos de fuerzas, en magnitudes y diferentes direcciones producen en el elemento diferentes tipos de esfuerzos por ejemplo: esfuerzo a compresión, a tensión, esfuerzo flector, de cizalla.

A cada esfuerzo aplicado o fuerza aplicada le corresponde una deformación cuya magnitud depende del material del cuerpo.



**Figura 9.** Ejemplos de deformaciones

Fuente: (Ramírez Navas Juan Sebastián, Introducción a la reología de los alimentos, 2006)

### 2.5.3.1 Tipos de deformación

Tanto para sólidos como para líquidos existen deformaciones; plástica o irreversible y la elástica o reversible. Todos los materiales existentes poseen estos dos tipos de deformaciones, la fase de deformación elástica está limitada por el límite elástico que es el límite al cual se puede retirar la carga aplicada al elemento y este vuelve a sus condiciones iniciales tanto geométricas como microestructurales. La deformación plástica surge tras superar el límite elástico en esta etapa la deformación del elemento en cuestión sufre una deformación irreversible que puede llegar a la rotura del elemento.

La deformación de cizallamiento, se produce cuando la dirección de la fuerza que se aplica al fluido es paralela a una superficie del fluido mientras la otra superficie se mantiene fija (Figura 9, b). En este tipo de deformación no se presenta ningún cambio de volumen solo de forma.

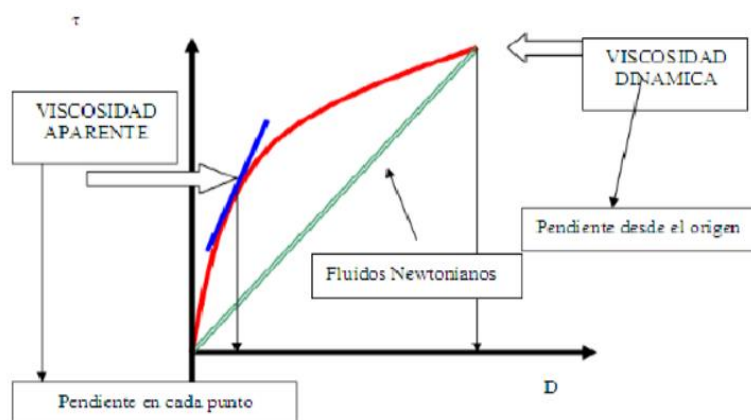
#### 2.5.4 Viscosidad.

Todos los materiales que tienden a fluir tienen una propiedad en común la “viscosidad”, que se la puede describir como la resistencia de movimiento de un fluido ante la aplicación de una fuerza de cizalla. Cuanta más resistencia presentan los líquidos a fluir son más viscosos. (Ponce & Astuhamánpardavé, 2011).

La viscosidad es el resultado del esfuerzo cortante para la velocidad de cizalla. Y es propia de cada fluido y está determinado por su estructura molecular ya que a moléculas de mayor tamaño estas presentaran mayor interacción molecular y por ende se desplazan más lentamente. Existen tres tipos de viscosidad; cinemática, aparente y dinámica

##### 2.5.4.1 Viscosidad Aparente “ $\eta$ ”

En fluidos no newtonianos, solo se puede hacer referencia a la viscosidad aparente. Para fluidos Newtonianos la viscosidad aparente y la viscosidad absoluta son las mismas.



**Figura 10.** Curva de fluidez, viscosidad dinámica y aparente

Fuente: (Ponce, S. & Astuhamánpardavé, 2011).

### 2.5.4.5 Parámetros que influyen en la viscosidad.

La viscosidad especialmente se ve afectada por:

- La temperatura
- La velocidad de deformación
- La presión
- El tiempo de aplicación de la velocidad de deformación.

#### 2.5.4.5.1 Efecto de la temperatura.

Generalmente en los fluidos líquidos, la viscosidad tiende a disminuir cuando se incrementa la temperatura, la variación es de orden exponencial y puede existir variaciones hasta de un 10% por cada °C que aumente.

La ecuación de Arrhenius es adecuada para describir el efecto que provoca la variación de la temperatura sobre la viscosidad de aceites. (Alvarado J. d., 1996)

$$k = A * e^{-\frac{Ea}{R*T}}$$

$$\ln k = - \left[ \frac{Ea}{R(T)} \right] + \ln A$$

Donde:

$k$  = constante cinética.

$A$  = constante llamada factor de frecuencia.

$T$  = temperatura absoluta. (K)

$Ea$  = energía de activación.  $\left( \frac{KJ}{mol} \right)$

$R$  = es la constante de los gases.  $\left[ 8.314 \left( \frac{J}{mol K} \right) \right]$

En la ecuación de Arrhenius se puede observar claramente al aumentar la temperatura “ $T$ ”, aumenta el factor de frecuencia “ $A$ ”, el cual es un factor que indica la frecuencia con que las moléculas del fluido interactúan entre sí o las colisiones de estas, tras estas reacciones disminuye la energía de activación “ $Ea$ ”, con todas estas condiciones la constante cinética “ $k$ ” disminuye.

#### 2.5.4.5.2 Efecto de la presión.

Cuando la viscosidad varía con la presión atmosférica en el orden de un bar no representa cambios considerables en la viscosidad del fluido, por esta razón para la mayoría de fluidos no se realiza el análisis del efecto de la presión, además que la presión no genera mucha influencia en los líquidos ya que estos casi en su totalidad son incomprensibles. Para el caso de lubricantes, aditivos automovilísticos, aceites, etc. Donde la presión aumenta considerablemente este es un factor que tiene mucha importancia. (Biollanos, 2014)

La ecuación de Barus y Kuss, rigie la variación de la viscosidad respecto a la presión

$$\mu = \mu_0 * e^{\alpha * P}$$

Donde:

$\mu_0$  = viscosidad a presión atmosférica.

$\mu$  = viscosidad a la presión P.

$\alpha$  = parámetro equivalente a  $“(0.6 + 0.965 * \log \mu) * 10^3”$

Para el caso que las presiones sean mucho más altas se suele utilizar la siguiente ecuación.

$$\mu = \mu_0 * (1 + C * P)^n$$

Donde:

$\mu_0$  = viscosidad a presión atmosférica.

$\mu$  = viscosidad a la presión P.

$C$  y  $n$  = constantes específicas para una temperatura determinada.

### 2.5.4.5.3 Efecto del tiempo de aplicación de la velocidad de cizalla.

Este efecto se enfoca al tipo de fluido analizado, afectando especialmente a fluidos tixotrópicos y fluidos respecticos los cuales tienen “historia”.

### 2.5.4.5.4 Efecto de la velocidad de cizalla.

Este es el factor más primordial desde el punto de vista reológico. La gran mayoría de fluidos presentan desviaciones con respecto a la ley de Newton, convirtiéndoles en fluidos no Newtonianos al ser su viscosidad una función de la velocidad de cizalla aplicada. La aplicación de diferentes velocidades de cizalla a diferentes tiempos demuestra el verdadero comportamiento y naturaleza del fluido tratado. (Darby, 1996)

**Tabla 1.**

*Rango de gradientes de velocidad para distintas aplicaciones industriales.*

Situación	Rango típico de velocidades de cizalla ( $s^{-1}$ )	Aplicaciones
Sedimentación de polvos finos en suspensión líquida	$10^{-6} - 10^{-4}$	Medicamentos, pinturas
Nivelación debido a la tensión superficial	$10^{-2} - 10^{-1}$	Pinturas, tintas de impresión
Drenaje por gravedad	$10^{-1} - 10^1$	Pinturas y revestimientos. Lejías de baño
Extrusión	$10^0 - 10^2$	Polímeros
Masticar y tragar	$10^1 - 10^2$	Alimentos
Recubrimiento por inmersión	$10^1 - 10^2$	Pintura, confitería
Mezcla y agitación	$10^1 - 10^3$	Fabricación de líquidos
Tubos y conducciones	$10^0 - 10^3$	Bombeo. Flujo sanguíneo
Pulverización y cepillado	$10^3 - 10^4$	Secado por pulverización, pintura, atomización de combustible
Fricción	$10^4 - 10^5$	Aplicación de cremas y lociones en la piel
Pigmentos de molienda en bases fluidas	$10^3 - 10^5$	Pinturas, tintas de impresión
Revestimiento de alta velocidad	$10^5 - 10^6$	Papel
Lubricación	$10^3 - 10^7$	Motores de combustión

Fuente: (Juan García Sánchez, Estudio reológico de dispersiones de líquido iónico con nanotubos de carbono, 2012)

## 2.6 Clasificación de los Fluidos.

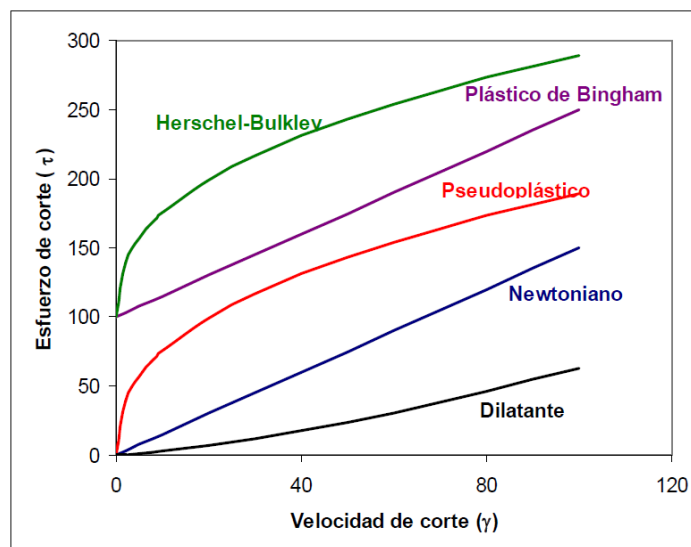
En el libro Introducción a la reología de los alimentos Ramírez (2006) :

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de esfuerzos cortantes. Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta ya sea como deformación o flujo. Todo fluido se va deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas. Dicho sistema de fuerzas se representa matemáticamente mediante el esfuerzo cortante " $\tau_{xy}$ ", mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación " $\dot{\gamma}$ " (pág. 29).

Un fluido puede ser definido y clasificado bajo conceptos de la reología, para mejores interpretaciones y usos posteriores.

Bajo este concepto de esfuerzo y la velocidad de cizalla se puede clasificar a los fluidos en tres grupos existentes:

- Fluidos Newtonianos.
- Fluidos no Newtonianos.
- Fluidos viscoelásticos



**Figura 11.** Esfuerzo de corte vs velocidad de corte.

Fuente: (Fluidos no Newtonianos, 2001)



### 2.6.1 Fluidos Newtonianos.

Fluidos Newtonianos; su comportamiento es proporcional, se rige a la ley de Newton, corresponde a una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y el gradiente de la velocidad de deformación (no posee esfuerzo de fluencia), además esta relación es independiente del tiempo. (Steffe & Daubert, 2006)

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Ley de Newton})$$

### 2.6.2 Fluidos no Newtonianos.

Fluido no Newtoniano; es el fluido que no cumpla con la ecuación de Newton o con las características de fluido Newtoniano, ya que la relación entre esfuerzo de cizalla y el gradiente de la velocidad de deformación deja de ser lineal. (Rojas, María, & Jorge, 2012)

El comportamiento de los fluidos no Newtonianos se clasifican en:

1. Dependiente del tiempo.
2. Independiente del tiempo.

#### 2.6.2.1 Fluidos no Newtonianos, comportamiento independiente del tiempo.

Se los puede describir bajo el modelo ley de potencia, por eso son conocidos también como “Fluidos Tipo Ley de Potencia”, se los puede clasificar si poseen o no esfuerzo umbral, esto significa si requieren un valor mínimo una fuerza externa para que el fluido tenga la capacidad de generar movimiento. (Andronico & Soto, 2002)

### **2.6.2.1.1 Fluidos sin esfuerzo umbral.**

#### **a) Fluidos Dilatantes (Shear-Thickening)**

Conocidos como fluidos espesantes (no muy comunes), a medida que aumenta la velocidad de deformación también aumenta el esfuerzo cortante y la viscosidad del fluido.

Entre estos fluidos podemos encontrar: arena mojada, dióxido de titanio, harina de maíz en disolución, etc.

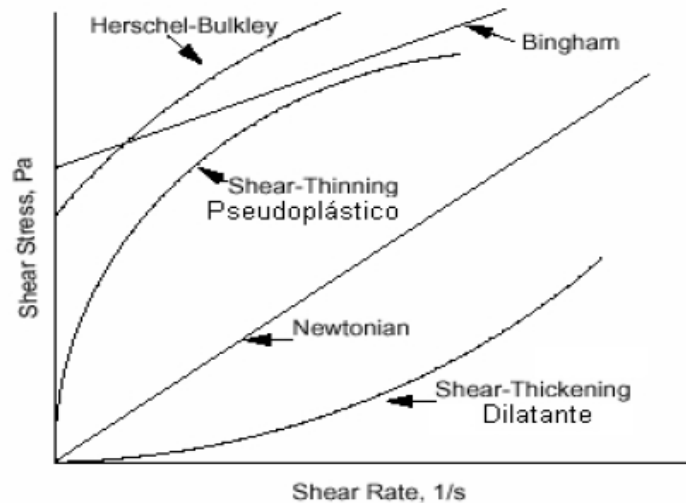
#### **b) Fluidos Pseudoplásticos (Shear-Thinning):**

Denominados fluidos adelgazantes (muy comunes). La principal característica de estos fluidos es que mediante aumenta la velocidad de deformación disminuye la viscosidad y el esfuerzo cortante de los líquidos pseudoplástico. La característica física que presentan estos fluidos es que a mayor velocidad de cizalla se vuelven menos espesos.

### **2.6.2.1.2 Fluidos con esfuerzo umbral, llamados también plásticos (viscoplásticos).**

Son fluidos que tienen dos comportamientos un comportamiento inicial de sólido y un comportamiento final como líquido, cuando estos fluidos sobrepasan un esfuerzo umbral, que es el esfuerzo mínimo para cambiar de comportamiento, cambia su comportamiento de sólido a líquido.

Al existir proporcionalidad entre la velocidad de deformación y el esfuerzo cortante, a partir del esfuerzo umbral inicial se denomina fluidos plásticos de Bingham y si esta proporcionalidad no existe solo toma el nombre de plásticos reales o fluidos Herschel Bulkley ya que este modelo matemático describe el comportamiento reológico de este tipo de fluidos.



**Figura 12.** Gráfica de esfuerzo de cizalla vs velocidad de deformación para fluidos independientes del tiempo.  
*Fuente:* (Eric Gahona, Introducción a la reología de alimentos).

### 2.6.2.2 Fluidos no Newtonianos, comportamiento dependiente del tiempo de aplicación.

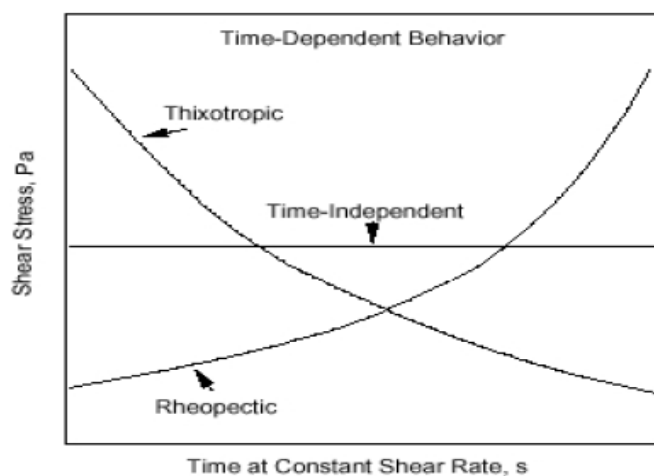
Los fluidos tixotrópicos y fluidos respecticos muestran disminución y aumento del esfuerzo de corte y viscosidad aparente, en el transcurso de un tiempo determinado a un gradiente de deformación constante. Estos fenómenos pueden ser reversibles, parcial mente reversibles o Irreversibles.

#### a) Fluidos Tixotrópicos:

En este tipo de fluidos al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante y manteniendo constante la velocidad de deformación para el mismo tiempo de aplicación la viscosidad disminuye. Por ende la viscosidad del fluido no depende solo de la velocidad de deformación, sino también del tiempo de duración de la deformación. El fluido recupera su estructura y condiciones iniciales después de un prolongado reposo, este fenómeno se denomina histéresis. (Quintáns, 2008)

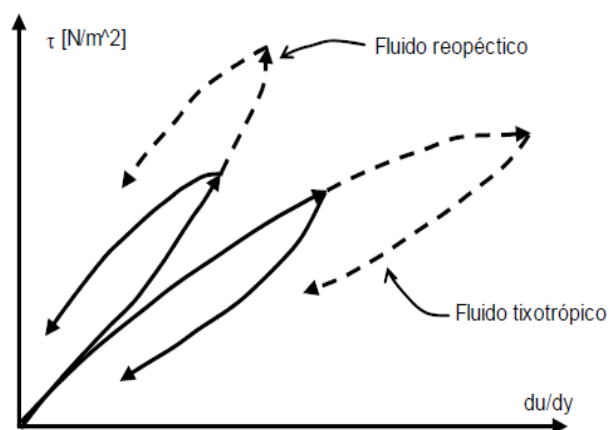
## b) Fluidos Reopéticos

Su comportamiento es contrario a los fluidos tixotrópicos, su viscosidad aumenta a medida que aumenta el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante y el tiempo en el cual se mantiene constante la velocidad de deformación. Presentando una histéresis inversa a los fluidos tixotrópicos.



**Figura 13.** Gráfica del comportamiento de la viscosidad para fluidos dependientes del tiempo.

Fuente: (Eric Gahona, Introducción a la reología de alimentos).



**Figura 14.** Esfuerzo de cizalla vs velocidad de deformación, para fluidos tixotrópicos y fluidos reopéticos.

Fuente: (<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/1/tema2RUA.pdf>)

### 2.6.2.3 Fluidos Viscoelásticos

Poseen al mismo tiempo propiedades viscosas característica propias de un fluido y propiedades elásticas, aspectos de sólidos.

Esta variedad de propiedades puede ser ocasionada que en el fluido exista estructuras moleculares largas o la presencia de partículas sólidas en estos. Como ejemplo de fluidos viscoelásticos podemos nombrar a: la gelatina, la nata, helado, etc.

## 2.7 Modelos reológicos para cada tipos de fluidos.

### 2.7.1 Ecuación de Newton.

El esfuerzo y velocidad de cizalla son directamente proporcionales.

$$\tau = -\mu \frac{d\vartheta}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$

Siendo:  $\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\mu$  = Constante de proporcionalidad “Viscosidad Newtoniana”

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación de cizallamiento.

### 2.7.2 Modelo de Ostwald de Waele o Ley de potencia:

Este modelo matemático se aplica para fluidos no newtonianos independientes del tiempo y que no posean esfuerzo umbral. Utilizado en la mayoría de aplicaciones prácticas.

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n = K * \left(-\frac{d\vartheta}{dy}\right)^n$$

Donde:  $\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación de cizallamiento.

$K$  = Índice se consistencia (parámetro empírico).

$n$  = Índice de comportamiento de flujo (parámetro empírico).

Si “ $n > 1$ ”, es un fluido dilatante

Si “ $n < 1$ ”, el fluido es pseudoplástico



**Figura 15.** Clasificación de los fluidos, con sus respectivos modelos reológicos.

Fuente: (Ramírez Navas Juan Sebastián, Introducción a la reología de los alimentos, 2006)

## 2.8 Instrumentos para medir la reología

El análisis de la reología de los aceites vegetales de: piñón, palma africana y palmiste africano, se la realizará en el reómetro de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, ubicado en el laboratorio de mecánica de fluidos, perteneciente a la carrera de ingeniería mecánica.

El reómetro a ser empleado es el: “DISCOVERY HYBRID RHEOMETER HR-2”, perteneciente a la compañía “TA Instruments”. Con todos los accesorios para el análisis de diferentes tipos de fluidos a diferentes condiciones de trabajo y con un software incluido para la obtención, representación e interpretación de datos que se obtienen en los diferentes ensayos.



**Figura 16.** Discovery Hybrid Rheometer HR-2

### Technical Specifications

Specification	HR-3	HR-2	HR-1
Bearing Type, Thrust	Magnetic	Magnetic	Magnetic
Bearing Type, Radial	Porous Carbon	Porous Carbon	Porous Carbon
Motor Design	Drag Cup	Drag Cup	Drag Cup
Minimum Torque (nN.m) Oscillation	0.5	2	10
Minimum Torque (nN.m) Steady Shear	5	10	20
Maximum Torque (mN.m)	200	200	150
Torque Resolution (nN.m)	0.05	0.1	0.1
Minimum Frequency (Hz)	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07
Maximum Frequency (Hz)	100	100	100
Minimum Angular Velocity <sup>[1]</sup> (rad/s)	0	0	0
Maximum Angular Velocity (rad/s)	300	300	300
Displacement Transducer	Optical Encoder	Optical Encoder	Optical Encoder
Optical Encoder Dual Reader	Standard	N/A	N/A
Displacement Resolution (nrad)	2	10	10
Step Time, Strain <sup>[2]</sup> (ms)	15	15	15
Step Time, Rate <sup>[2]</sup> (ms)	5	5	5
Normal/Axial Force Transducer	FRT	FRT	FRT
Maximum Normal Force (N)	50	50	50
Normal Force Sensitivity (N)	0.005	0.005	0.01
Normal Force Resolution (mN)	0.5	0.5	1

### Instrument Features

#### Discovery Series Hybrid Rheometer Features

Patented Ultra-low Inertia Drag Cup Motor
Patented Second Generation Magnetic Bearing
High-Resolution Optical Encoder
Optical Encoder Dual Reader (Patent Pending) <sup>[3]</sup>
Normal Force Rebalance Transducer (FRT)
True Position Sensor (Patent Pending)
Nano-Torque Motor Control
Superior True Stress, Strain, and Strain Rate Control
Direct Strain Oscillation <sup>[4]</sup>
Thrust & Dual-Radial Bearing Design
Ultra-low Compliance Single-Piece Frame
Heat and Vibration Isolated Electronics Design
Patented Smart Swap™ Geometries
Original Smart Swap™ Temperature Systems
Superior Peltier Technology
Patented Heat Spreader Technology
Patented Active Temperature Control
Color Display
Capacitive Touch Keypad
Patented Traceable Torque Calibration

[1] Zero in controlled stress mode. Controlled rate mode depends on duration of point being measured and sampling time.

[2] Results at 99% of commanded value

[3] Discovery HR-3 model only

[4] Discovery HR-2 and HR-3 models only

### **Figura 17.** Especificaciones técnicas del reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2

Fuente: (Según el autor, Manual Discovery Hybrid Rheometer)

### 2.8.1 Accesorios y geometrías del Reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2

Los accesorios son los dispositivos en donde se coloca la muestra que se analizará, estos tienen la propiedad de variar sus condiciones de trabajo (niveles de temperatura) para experimentar las condiciones de trabajo requeridas.

El plato peltier es el accesorio más difundido. En la mayoría de los ensayos reológicos que se elaboran en el reómetro su accesorio base es el plato peltier. Este accesorio funciona como una base fija en donde descansa la muestra del fluido a ser analizado y proporciona los cambios de temperaturas requeridos por el ensayo. Este va a hacer el accesorio utilizado en los experimentos.



*Figura 18.* Plato Peltier.

Las geometrías son los instrumentos con los cuales se realiza los análisis reológicos de los diferentes fluidos, existe una gran variedad de geometrías su aplicación depende del tipo de fluido a ser analizado y las condiciones de trabajo a las cuales van a ser sometido estos líquidos.





**Figura 19.** Geometría de cara plana con 40 mm de diámetro y 2 ° de inclinación.

Esta geometría de cara inclinada de 2°, es ideal para materiales con viscosidades bajas que presenten estructuras moleculares un poco más espesas o consistentes.

### **2.8.2 Descripción del funcionamiento del reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2.**

El reómetro es un instrumento de laboratorio que sirve para analizar la forma que fluye un fluido, mezcla, suspensiones, disolución, emulsiones, etc., cuando estas son sometidas a fuerzas externas. Un reómetro se emplea generalmente en fluidos que requieran más parámetros que los que puede proporcionar un viscosímetro. También es utilizado cuando la mezcla a analizar presenta composiciones moleculares complejas o los experimentos a ser ejecutados requieren la variación de diferentes condiciones para los ensayos.

Para determinar el comportamiento y características del fluido, es necesario aplicar un esfuerzo de cizalla. La placa inferior se mantiene fija mientras que la placa superior gira. Las partículas del fluido cercanas a la placa móvil tendrán una velocidad superior a las partículas que se encuentran cercanas a la placa fijas.

Los instrumentos mecánicos que se utilizan para la realización de experimentos en los reómetros, poseen diferentes formas y dimensiones, estas variaciones depende del tipo del fluido que se desea analizar y también las características del experimento a realizar. Entre los

principales accesorios encontramos: superficies de caras paralelas, cilindros concéntricos o superficie plana y un cono de pequeño ángulo. (Técnicas Reométricas: rua)

### **2.8.3 Software “Trios” de TA Instruments.**

El reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2, está conectado a un ordenador que posee el programa llamado “Trios”. Trios es el paquete de software de TA Instruments, que acompaña al reómetro para que todas las actividades que realiza y se realizan en reómetro sean procesadas lógicamente y los resultados sean visibles y entendibles al operador. Este software controla geometrías y accesorios, recopila de datos y análisis de los mismos, posee una interfaz de usuario intuitiva que permite de forma sencilla y efectiva la programación de experimentos e interpretación de los resultados, un manejo amplio de parámetros para diferentes pruebas y ensayos, capacidad para control de varios instrumentos a la vez, memoria de actividades, etc.

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA DE LOS PROCEDIMIENTOS Y EXPERIMENTOS A SER EJECUTADOS EN EL PROYECTO Y COMPARACIÓN DE DATOS.

#### 3.1 Determinación y preparación de muestras.

Los aceites a ser analizados son tres: aceite de piñón, palma africana y palmiste africano. Para realizar los ensayos se requiere que estos aceites se encuentren en estado puro, sin ningún tipo de impurezas, tampoco contengan algún tipo de aditivos, cumpliendo estas condiciones se procederá a los análisis reológicos.

El aceite de piñón con el cual se analizará en estos ensayos es el mismo que se utiliza como combustible para la generación de electricidad en las islas Galápagos. Este aceite se obtuvo del INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables), este instituto que desarrolla e impulsa aspectos tecnológicos del país, se encontraba analizando este aceite de jatropha. Esta entidad pública obsequio unas pequeñas muestras de aceite para poder realizar el estudio reológico del mismo. Todo el proceso que con lleva a la extracción del aceite de la semilla de jatropha, junto con el proceso de filtración del mismo se suprimieron ya que las muestras obsequiadas por el INER, son muestras ya listas para uso, libre de impurezas.



*Figura 20.* Aceite de Jatropha.

El aceite de palma africana junto al aceite de palmiste africano se obtuvieron de la extractora de aceite vegetal, SAN DANIEL S.A. estos aceites no poseen refinación ni tratamientos químicos, su estado se encuentra en estado puro sin ningún tipo de tratamiento. Ideales para su uso en los diferentes ensayos para determinar el comportamiento reológicos de los mismos



**Figura 21.** Aceite de palma africana.



**Figura 22.** Aceite de palmiste africano.

### **3.1.1 Acondicionamiento de los aceites vegetales para su uso en los ensayos.**

El aceite de piñón no requiere de ningún tipo de filtración para la eliminación de impurezas ya que gracias al INER, el aceite obtenido de esta institución se encontraba total mente filtrada y libre de impurezas. Los dos aceites restantes tanto el aceite de palma africana y el aceite del palmiste africano tampoco contienen algún tipo de impurezas, inmediatamente después de su extracción de la semilla de palma africana y del coquito integral respectivamente, fueron procesados y almacenados. En el caso de estos aceites si existe algún tipo de impurezas propias del proceso de extracción, se realizara un filtrado para descartar cualquier tipo de residuos. El almacenamiento de los aceites serán almacenados en envases adecuados para su posterior uso en los ensayos, si estos se llegan a solidificarse se realizara el procedimiento de calentamiento de los mismos.

### **3.2 Determinación de las geometrías y accesorios, para la elaboración de los ensayos en el reómetro.**

Para un correcto análisis reológico es indispensable realizar el análisis de geometrías y accesorios, para que estos abarquen todas las condiciones de operación a las cuales se pretende realizar los ensayos.

El accesorio seleccionado es el “plato peltier”, sin ningún tipo de accesorio protector o acondicionador de temperatura, ya que las características de trabajo del plato peltier son óptimas para todos los ensayos a realizar. Entre las principales características se encuentran:

- Los fluidos que pueden ser analizados alcanzan una extensa y variada estructura molecular.

- La temperatura de operación se encuentra entre los  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ , con precisión de la temperatura de  $0.1^{\circ}\text{C}$ .
- Velocidades de calentamiento de hasta  $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- Su superficie es circular con un diámetro de 80 mm, su disco es de cobre delgado con una superficie extremadamente resistente y endurecido.
- El tamaño de la muestra que se requiere para realizar los experimentos es mínimo.

Las geometrías seleccionadas son:

Geometría de base plana con diámetro de 25 mm: esta geometría es ideal para alcanzar las mayores velocidades de cizalla  $49000\ 1/\text{seg}$ .

Geometría de base inclinada de  $2^{\circ}$ , con un diámetro de 40 mm esta geometría se acondiciona perfectamente a ensayos de rotación. Además son ideales para fluidos que presentan condiciones moleculares de gran tamaño. (htt)

Dichas geometrías son de acero inoxidable, la cual posee buena resistencia para materiales ácidos y bases. Las dos requieren una mínima cantidad de muestra para realizar los ensayos.

La distancia existente entre geometría y el plato peltier, que es el accesorio, es de 75 micras de longitud, esta distancia es la pre determinada por el fabricante del reómetro para la geometría de cara plana y de cara inclinada.

Esta distancia es un factor muy importante, ya que determina la cantidad de fluido que será analizado, evitando problemas de exceso de muestra o falta de la misma.

Se considera una distancia de 25 micras antes de iniciar los ensayos. Esta distancia es ideal para limpiar los excesos de muestra y acondicionar los instrumentos para iniciar el experimento.

**Tabla 2.**

*Características de la geometría utilizada y sus parámetros de trabajo, para geometría de cara plana.*

Parámetros	Cantidad	Unidades
Diámetro de la geometría	25	mm
Gap	75	μm
Loading gap	26500	μm
Trim gap offset	50	μm
Material	Steel	
Environmental system	ETC	
Serial de la geometría	100104	
Tamaño de muestra requerida	0.0368155	ml

**Tabla 3.**

*Características de la geometría utilizada y sus parámetros de trabajo, para geometría de cara inclinada.*

Parámetros	Cantidad	Unidades
Diámetro de la geometría	40	mm
Cone angle	2:01:05	deg:min:seg
Truncation Gap	75	μm
Trim gap offset	25	μm
Loading gap	45000	μm
Material	Steel	
Environmental system	Peltier Plate	
Serial de la geometría	998160	
Tamaño de muestra requerida	0.59039	ml

En la tabla 2, se observa las características dimensionales propias de cada ensayo y las propiedades por defecto, cuando se utiliza la geometría de cara plana utilizados y en la tabla 3, se muestran las condiciones pero cuando se utiliza la geometría de cara inclinada.

### **3.3 Protocolo de ensayos y condiciones de trabajo para cada experimento a realizar en el reómetro.**

Todos los aceites serán sometidos al mismo tipo de experimentos e igual número de ensayos para comprobar su comportamiento reológico. Estos ensayos estarán delimitados por

diferentes condiciones operacionales para comprender de mejor manera el comportamiento del fluido. Cada ensayo se realizara tres veces para comprobar que los resultados tengan un comportamiento repetitivo y constante.

### **3.3.1 Fijar las temperaturas de operación a las cuales se realizaran los experimentos.**

Las temperaturas a las cuales se realizaran los experimentos son:

- Diez grados centígrados.
- Veinte grados centígrados.
- Cincuenta grados centígrados.
- Ochenta grados centígrados.
- Ciento diez grados centígrados.

Estas temperaturas fueron seleccionadas para optimizar el alcance a los diferentes usos que se puedan aplicar en la industria con estos aceites. Con un rango de 100°C iniciando en 10°C hasta 110°C.

### **3.3.2 Programación de pruebas sobre el fluido.**

Es necesario establecer un cronograma de pruebas para delimitar a qué condiciones de trabajo los aceites cambian sus características estructurales y su comportamiento.

#### **3.3.2.1 Rampa de flujo o Flujo estacionario.**

Este ensayo consiste en mantener una temperatura constante mientras el fluido es sometido a un aumento progresivo de un esfuerzo de corte. El rango de variación de la velocidad de cizalla está entre 0.01 1/s – 49000 1/s.

Con este ensayo se podrá determinar:



- Tipo de fluido: En este tipo de ensayos se determina el esfuerzo y la viscosidad del fluido en función de la velocidad de cizalla, con estos parámetros se puede reconocer la naturaleza del aceite.
- Comportamiento del fluido: Con los resultados de este ensayo se identificará el comportamiento del aceite en los diferentes rangos de velocidad de cizalla.
- Aplicaciones industriales: Como ya se mencionó el rango típico de la velocidad de cizalla nos indicará en que aplicaciones y usos se podría implementar el aceite analizado.

**Tabla 4.**

*Parámetros operativos para el ensayo de flujo estacionario de los aceites de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en el programación del ensayo.*

Parámetros	Cantidad	Unidades
Temperatura de operación	80	°C
Velocidad de cizalla inicial	0.01	1/s
Velocidad de cizalla final	49000	1/s
Número de puntos	15	

En la tabla 4 se observa los parámetros programados por el usuario para la realización de los ensayos de flujo estacionario de todos los aceites a ser analizados.

### **3.3.2.2 Barrido de temperatura.**

Se determina la variación de la viscosidad en función de la temperatura. El aceite es sometido al aumento gradual de temperatura mientras se mantiene constante la velocidad de cizalla, para determinar la variación que sufre la viscosidad a lo largo de todo el experimento. Los valores de velocidades de cizalla son: 10 (1/seg), 100 (1/seg), 1000 (1/seg), 10000 (1/seg), 49000 (1/seg), estos valores se toman como referencia de los resultados obtenidos en los ensayos

de flujo estacionario. El avance de la temperatura se lo realiza desde 10°C hasta 110°C con intervalos de 5°C/min.

Correspondientemente en la tabla 5, se detallan los parámetros operacionales que gobiernan los ensayos de barrido de temperatura.

**Tabla 5.**

*Parámetros operativos para el ensayo de barrido de temperatura del aceite de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en la programación del ensayo.*

Parámetros	Cantidad	Unidades
Temperatura de operaciónn inicial	10	°C
Temperatura de operación final	110	°C
Velocidad de cizalla fijada	100	1/s
Aumento de la rampa de temperatura	5	°C/min

**3.3.2.3 Barrido de amplitud:**

El ensayo de barrido de amplitud es una técnica que analiza las propiedades viscoelásticas de un fluido, mediante el uso de perturbaciones sinusoidales en la zona elástico – lineal, para determinar las propiedades dinámicas. (Benavete, 2011)

Cuando se tiene establecido el comportamiento del fluido, se procede con un ensayo de “barrido de amplitud”, esto se realiza para detectar si existe en fluido un cambio de propiedades estructurales. Para este tipo de ensayos se trabaja a una temperatura constante estableciendo la frecuencia angular como parámetro de análisis que para estos aceites vegetales se realizaran ensayos a 600 rad/seg, 100 rad/seg, 10rad/seg y 1 rad/seg, además delimitando un rango de porcentaje de deformación que se establece desde 0.01% hasta un 100%.

En la tabla 6 se detallan los parámetros operacionales de los ensayos de barrido de amplitud aplicados para todos los aceites analizados.

**Tabla 6.**

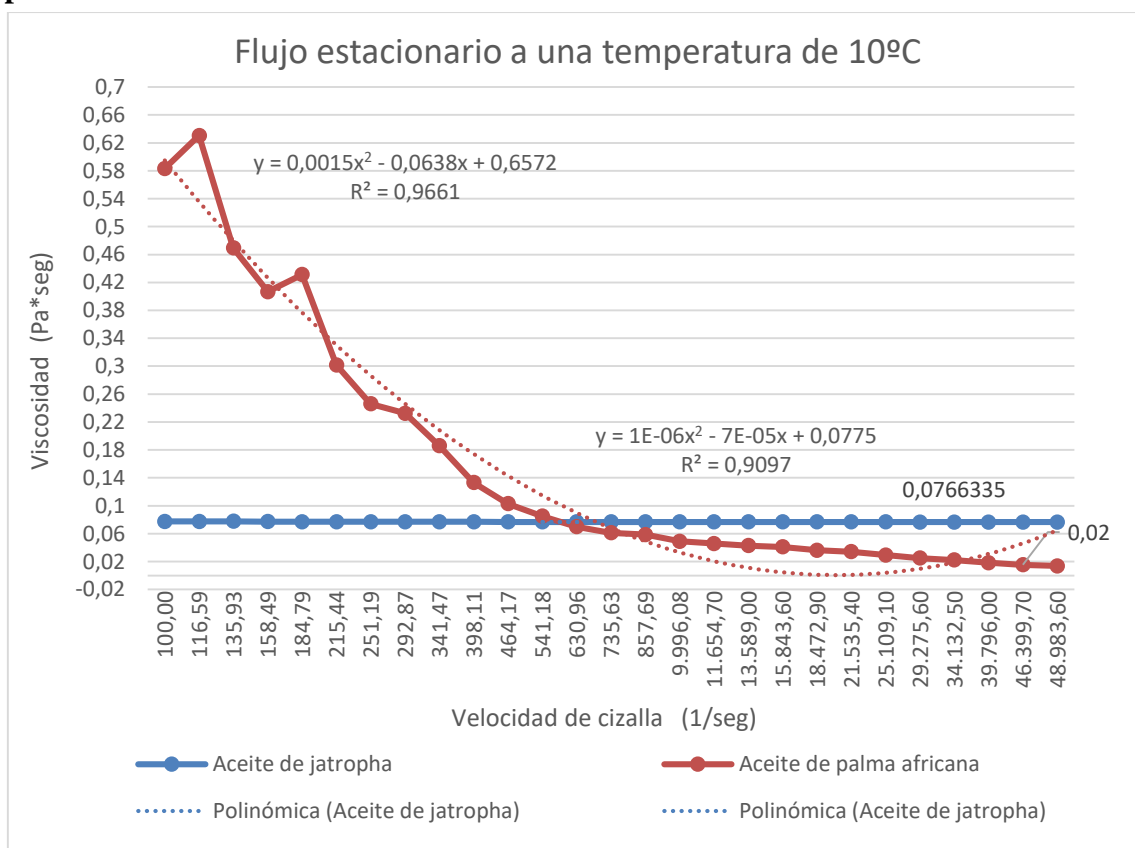
*Parámetros operativos para el ensayo de barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma africana y palmiste africano. Delimitados en la programación del ensayo.*

Parámetros	Cantidad	Unidades
Temperatura de operación	10	°C
Frecuencia angular	100	rad/seg
Porcentaje de deformación	0.01 - 100	%
Puntos por década	10	°C/min

### 3.4 Elaboración de ensayos de flujo estacionario, barrido de temperatura y barrido de amplitud, de los aceites de, *Jatropha Curcas L*, palma africana y palmiste africano.

#### 3.4.1 Ensayos de flujo estacionario al aceite de piñón, palma y palmiste.

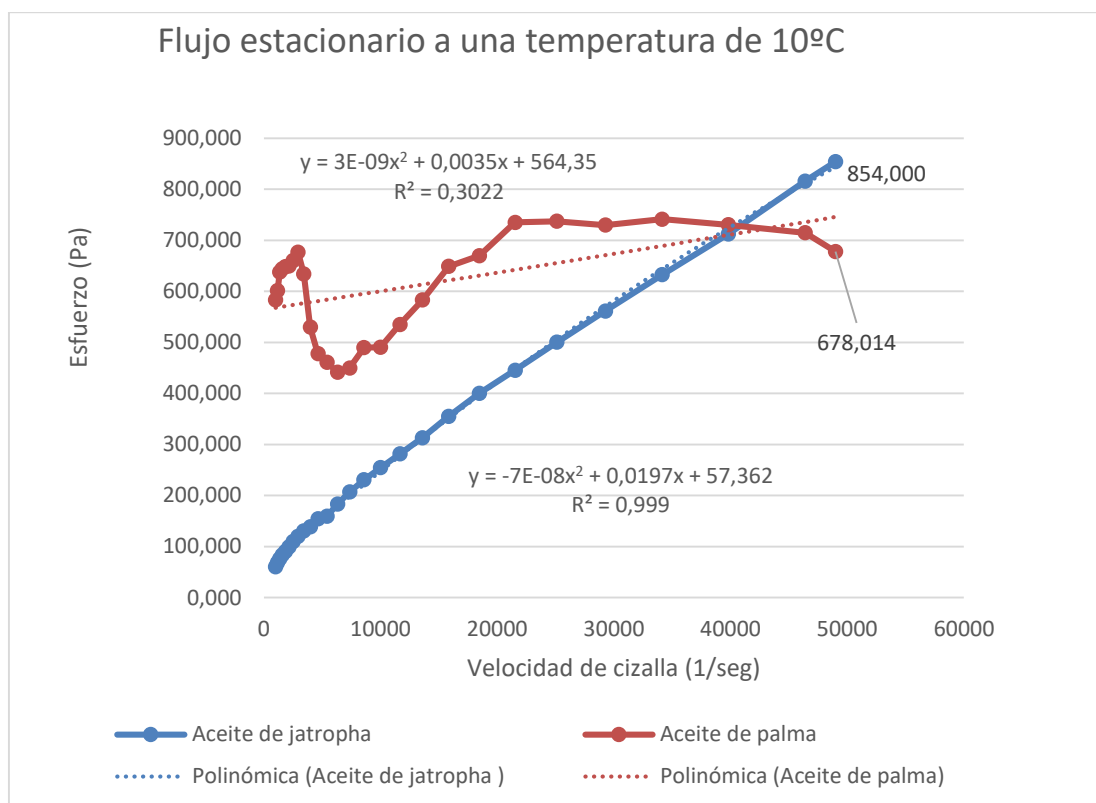
##### 3.4.1.1 Ensayo reológico, flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste, con temperatura constante de 10°C.



**Figura 23.** Flujo estacionario del aceite de jatropha y palma a 10°C. (Viscosidad).

En la figura 23, se observa la viscosidad de los aceites de palma y jatropha, el aceite de palmiste no pudo ser analizado porque a temperaturas inferiores a 30°C, este se solidifica impidiendo realizar su análisis en el reómetro.

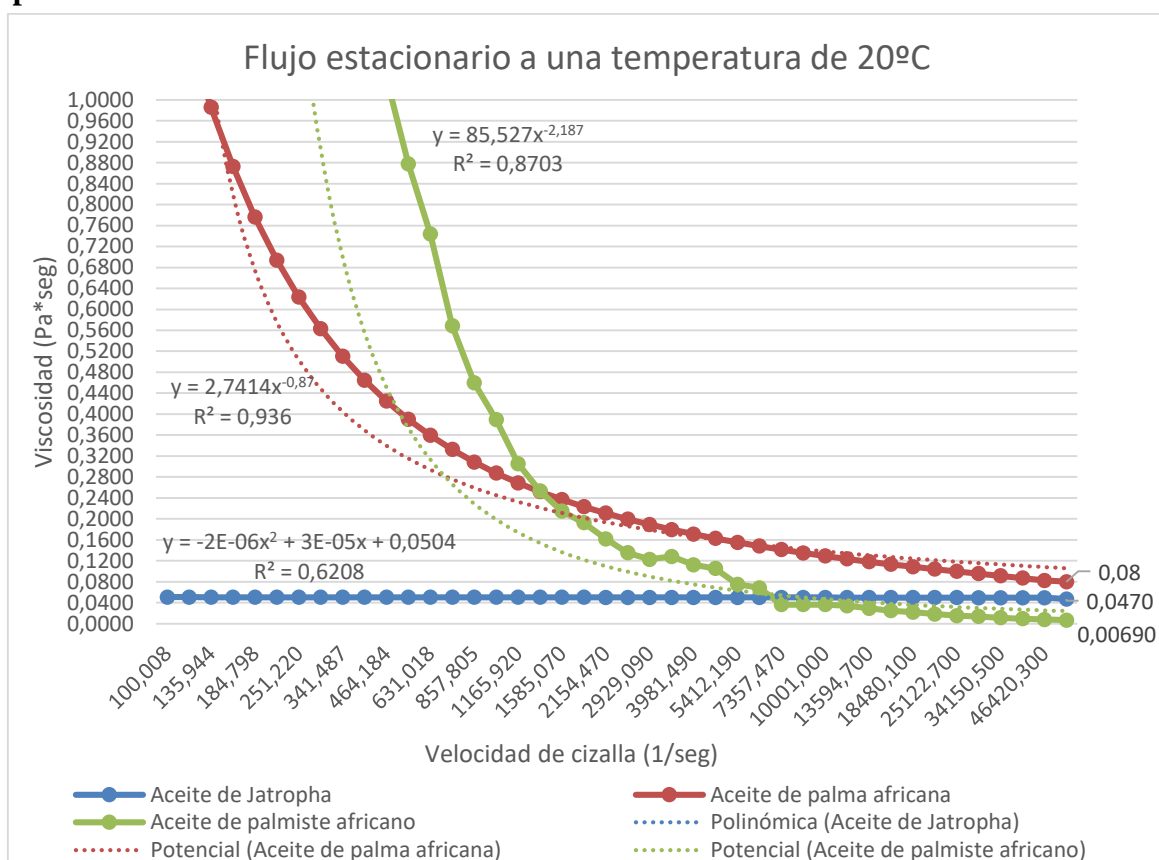
El aceite de jatropha presenta una viscosidad irregular hasta que la velocidad de cizalla alcanza los 100 (1/seg), a partir de esta velocidad de cizalla su viscosidad tiene un comportamiento casi lineal con un valor promedio de 0.076 (Pa\*seg), mientras que la viscosidad del aceite de palma sufre una disminución logarítmica, en todo el ensayo teniendo un valor de 0.60 (Pa\*seg) a una velocidad de cizalla que inicia en 100 (1/seg), terminando con una viscosidad correspondiente a 0.02 (Pa\*seg) a una velocidad de cizalla final de 49000 (1/seg).



**Figura 24.** Flujo estacionario del aceite de jatropha y palma a 10°C. (Esfuerzo).

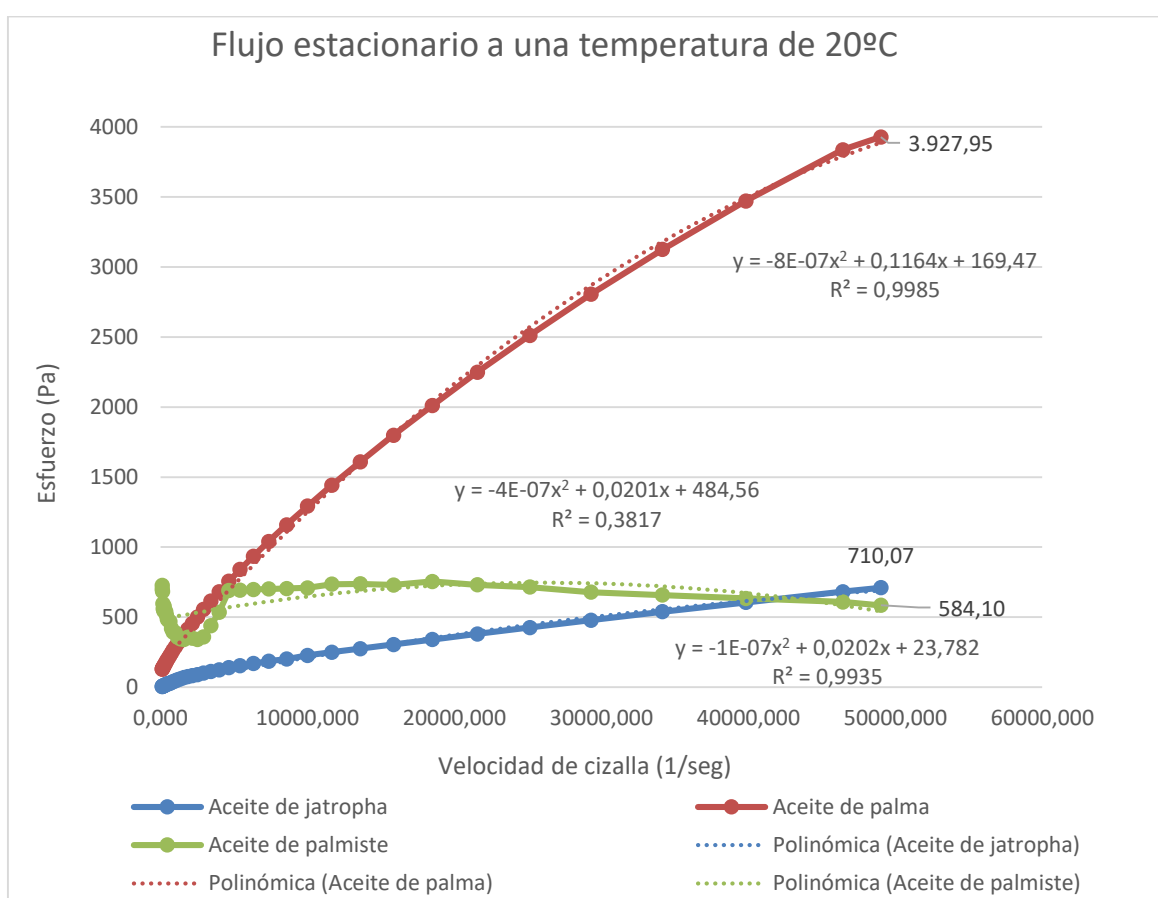
En la gráfica 24 se puede observar el esfuerzo de estos dos aceites, el aceite de jatropha presenta una pendiente que inicia con un valor aproximado de 0.004 (Pa), y termina en 854 (Pa). Al contrario el aceite de palma presenta un esfuerzo muy irregular que bordea los 700 (Pa), hay que recalcar que este aceite a temperatura inferiores a 40°C, presenta un cambio de estado físico, ya que su estructura se torna pastosa y se recomienda su almacenamiento a temperaturas entre 40°C – 50C. (Rincón, 2009). Con posteriores análisis se aclarará si este comportamiento es solo un fenómeno de temperatura o existe un cambio estructural del fluido.

### 3.4.1.2 Ensayo reológico, flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste, con temperatura constante de 20°C.



**Figura 25.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 20°C. (Viscosidad).

En esta figura la viscosidad de la jatropha se mantiene lineal con un valor promedio de 0.048 (Pa\*seg), a lo largo de toda la variación del esfuerzo de corte, mientras que las viscosidades del aceite de palma y de palmiste tienen una disminución logarítmica, a la velocidad de cizalla de 100 (1/seg) la palma tiene una viscosidad de 1.20 (Pa\*seg) y el aceite de palmiste tiene 7.28 (Pa\*seg), teniendo como valores finales para el aceite de palma una viscosidad de 0.09 (Pa\*seg), y para el aceite de palmiste es de 0.006 (Pa\*seg).

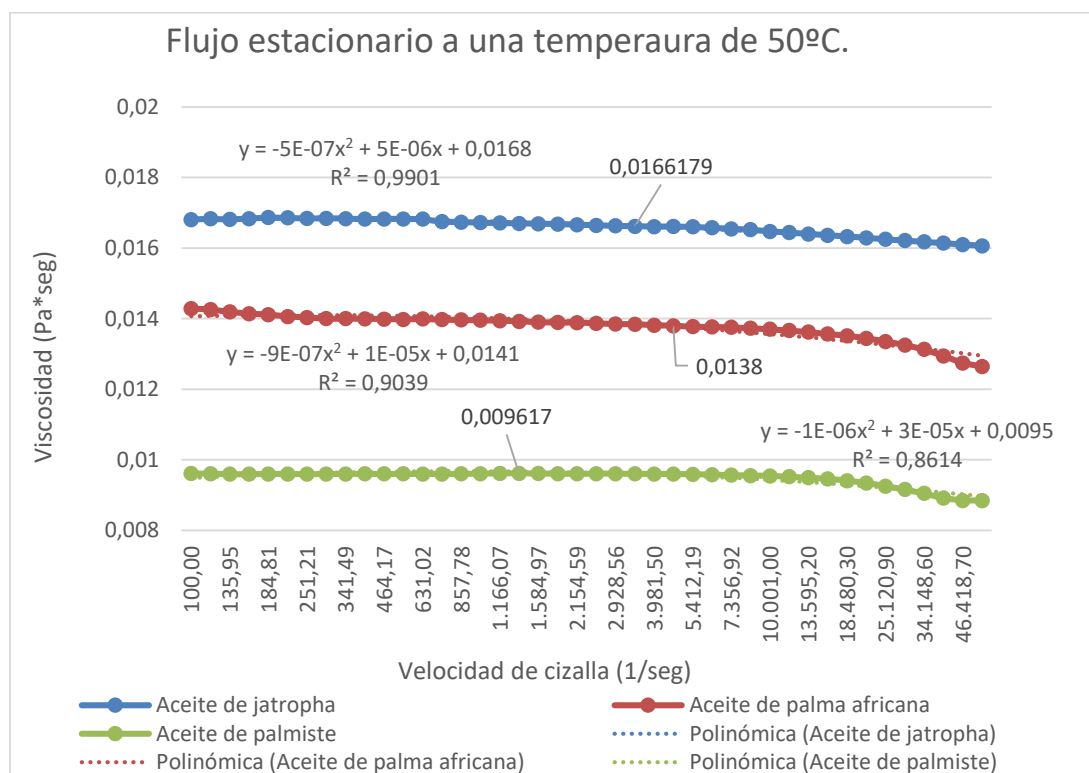


**Figura 26.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 20°C. (Esfuerzo)

En la figura 26 se observa los esfuerzos de los tres aceites, el aceite de jatropha y el aceite de palma presentan características de un fluido newtoniano ya que su gráfica es una pendiente. El aceite de jatropha su esfuerzo final es de 710,07 (Pa) y el esfuerzo final del aceite de palma es de

3927.95 (Pa), superior en un 81.93% al aceite de jatropha. El aceite de palmiste no presenta características newtonianas, este comportamiento se esclarecerá con ensayos posteriores.

### 3.4.1.3 Ensayo reológico, flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste, con temperatura constante de 50°C.



**Figura 27.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 50°C. (Viscosidad)

A un temperatura de 50°C, los tres aceites se encuentran en un estado físico completamente líquido. En la figura 27, ya observamos un comportamiento lineal en las viscosidades de los tres aceites. Cabe recalcar que todas las gráficas son analizadas a partir de una velocidad de cizalla de 100 (1/seg), a la cual los fluidos presentan comportamientos estables y repetitivos.

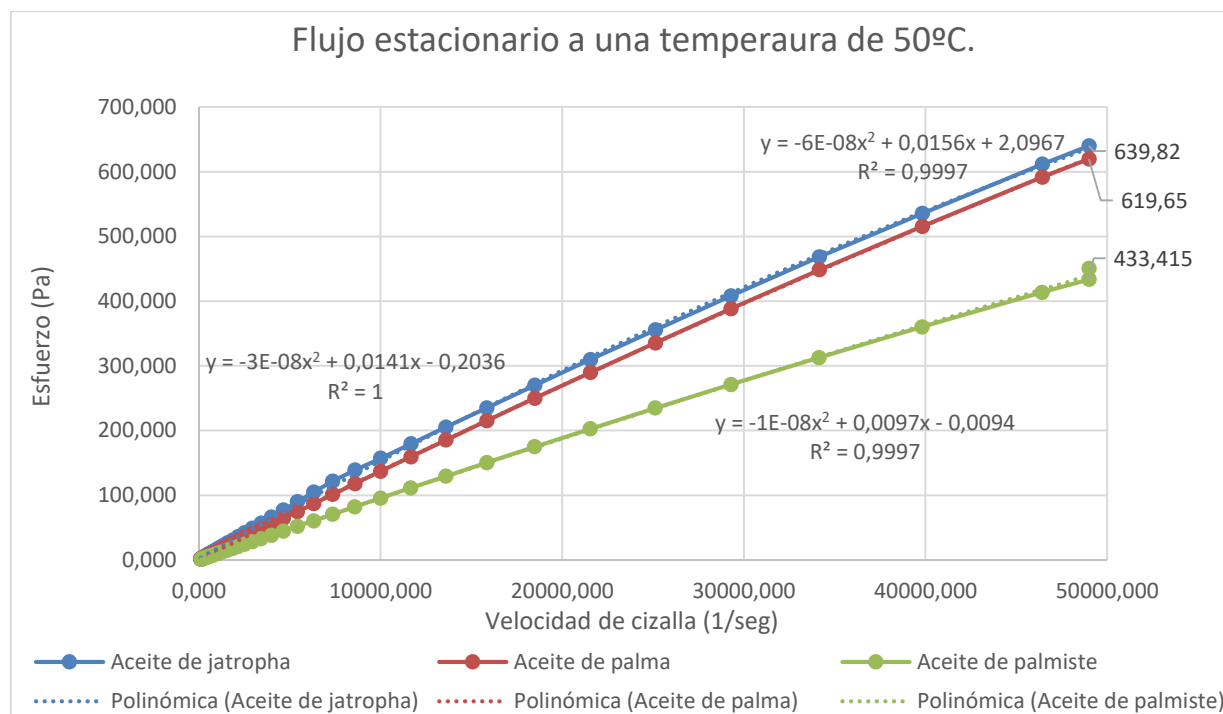
Con una temperatura de 50°C, y un rango de velocidad de cizalla entre 100 (1/seg) hasta 49000 (1/seg), el aceite de jatropha posee una viscosidad de 0.016 (Pa·seg), la palma tiene una viscosidad de 0.013 (Pa·seg), y el palmiste de 0.009 (Pa·seg). Analizando estas viscosidades se

obtiene que el aceite de jatropha es un 18.75 % más viscoso que el aceite de palma y un 43.75 % más viscoso que el aceite de palmiste, mientras que el aceite de palma es 30.77 % más viscoso que el aceite de palmiste.

**Tabla 7.**

*Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 20°C.*

Aceite	Viscosidad (Pa*seg)	Porcentaje %	Porcentaje %
Jatropha	0,016	18,75	
Palma	0,013	30,77	
Palmiste	0,009		43,75



**Figura 28.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 50°C. (Esfuerzo)

En la figura 28 observamos los esfuerzos de cada aceite, los tres presentan comportamiento newtoniano. El aceite de jatropha es el fluido que presenta el valor de esfuerzo más alto a una velocidad de cizalla correspondiente a 49000 (1/seg), con un valor de 639.82 (Pa), es 3.16% mayor al esfuerzo del aceite de palma que posee un esfuerzo final de 619.65 (Pa) y un



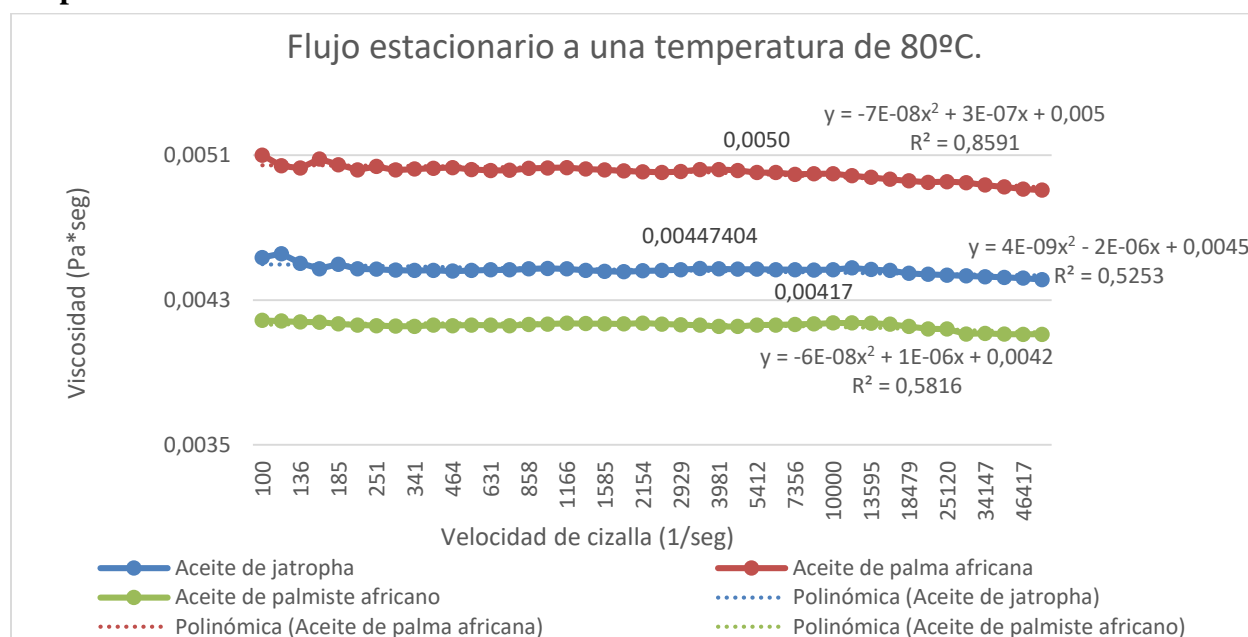
32.26% mayor al esfuerzo del aceite de palmiste que tiene un esfuerzo final de 433.41 (Pa). Y el aceite de palma presenta un esfuerzo mayor en un 30.06% al esfuerzo del aceite de palmiste.

**Tabla 8.**

*Esfuerzo de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 50°C.*

Aceite	Viscosidad (Pa)	Porcentaje %	Porcentaje %
Jatropha	639,82	3,15	
Palma	619,65	30,05	
Palmiste	433,42		32,26

### 3.4.1.4 Ensayo reológico, flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste, con temperatura constante de 80°C.



**Figura 29.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 80°C. (Viscosidad).

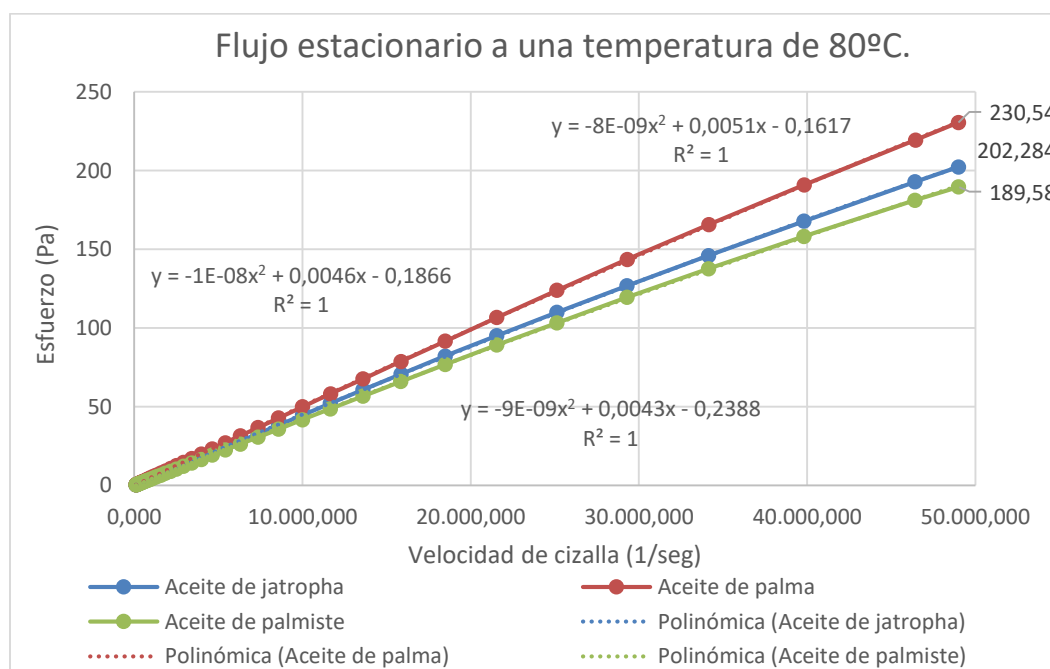
En la figura 29, observamos el resultado del flujo estacionario a una temperatura de 80°C, Las viscosidades se comportan de una manera muy lineal y coherente. La viscosidad del aceite de jatropha es 0.0044 (Pa\*seg), la palma posee una viscosidad de 0.005 (Pa\*seg), y el palmiste posee una viscosidad de 0.0041 (Pa\*seg). Con estos resultados se establece que el aceite de

palma a esta temperatura y con el mismo rango de variación de la velocidad de cizalla tiene una viscosidad 12 % mayor a la viscosidad del aceite de jatropha y es 18 % más viscoso que el aceite de palmiste, mientras que el aceite de la jatropha es un 6.82 % más viscoso que el aceite de palmiste.

**Tabla 9.**

*Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 80°C.*

Aceite	Viscosidad (Pa*seg)	Porcentaje de incremento %	Porcentaje de incremento %
Palma	0,005	12,00	
Jatropha	0,0044	6,82	
Palmiste	0,0041		18,00



**Figura 30.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 80°C.

Aquí observamos el resultado del esfuerzo del flujo estacionario a una temperatura de 80°C, el aceite de palma es presenta el mayor esfuerzo con un valor de 230.54 (Pa), teniendo una superioridad del 12.26 % al aceite de jatropha cuyo esfuerzo es de 202.28 (Pa) y un 17.77 % al

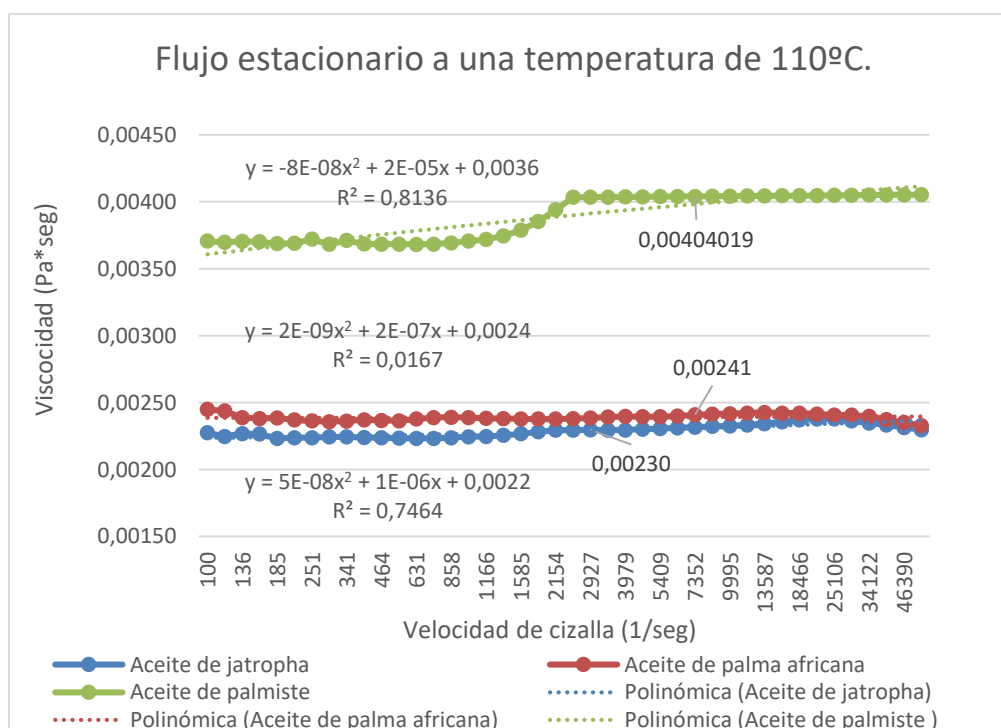
aceite de palmiste que presenta un esfuerzo de 189.58 (Pa). Mientras que el aceite de jatropa es 6.28 % más resistente a la cizalladura.

**Tabla 10.**

*Esfuerzo de los aceites de jatropa, palma y palmiste, a 80°C.*

Aceite	Viscosidad (Pa*seg)	Porcentaje de incremento %	Porcentaje de incremento %
Palma	230,54	12,26	
Jatropa	202,284	6,28	
Palmiste	189,58		17,77

### 3.4.1.5 Ensayo reológico, flujo estacionario del aceite de jatropa, palma y palmiste, con temperatura constante de 110°C.



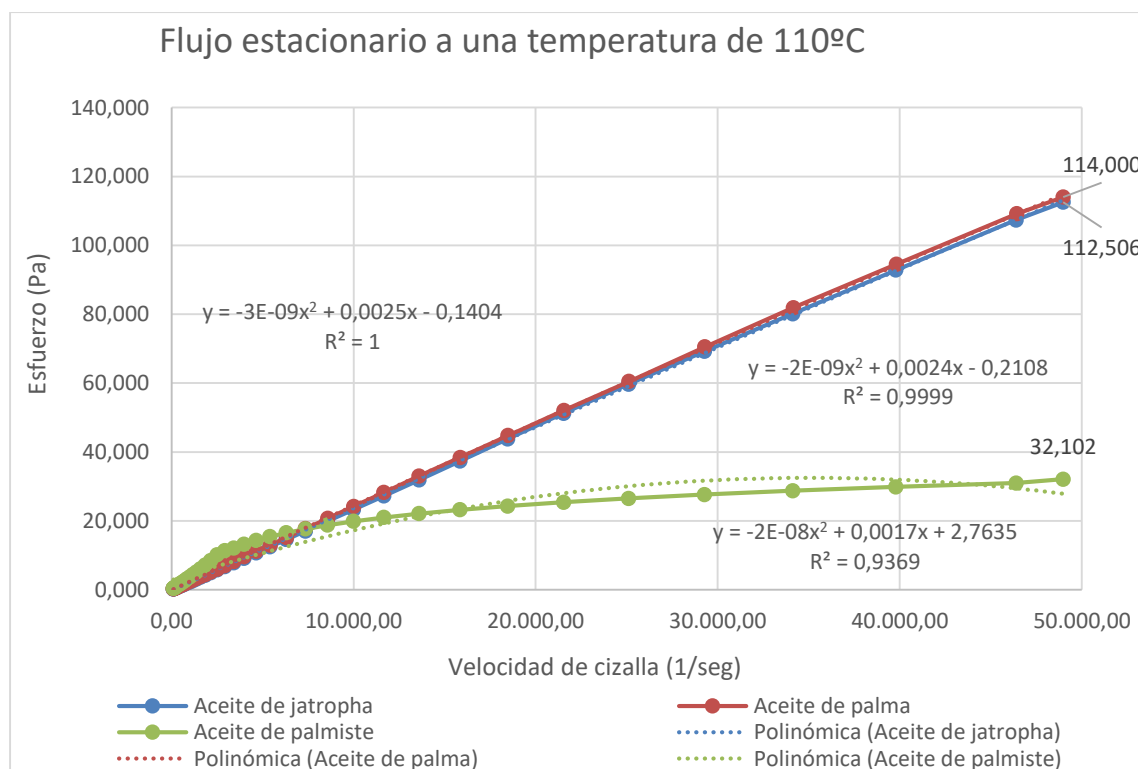
**Figura 31.** Flujo estacionario del aceite de jatropa, palma y palmiste a 110°C. (Viscosidad).

En esta figura observamos el flujo estacionario de los tres aceites a una temperatura de 110°C. La viscosidad del aceite de jatropha es de 0.0023 (Pa\*seg), la viscosidad del aceite de palma tiene un valor de 0.0024 (Pa\*seg), mientras que la viscosidad del aceite de palmiste es de 0.004 (Pa\*seg). La viscosidad del aceite de palmiste es un 40 % mayor a la viscosidad del aceite de palma y un 42.50% mayor a la viscosidad del aceite de jatropha, mientras que la palma presenta una viscosidad superior a la viscosidad del aceite de jatropha en un 4.17 %.

**Tabla 11.**

*Viscosidad de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 110°C*

Aceite	Viscosidad (Pa*seg)	Porcentaje de incremento %	Porcentaje de incremento %
Palmiste	0,004	40,00	
Palma	0,0024	4,17	
Jatropha	0,0023		42,50



**Figura 32.** Flujo estacionario del aceite de jatropha, palma y palmiste a 110°C. (Esfuerzo).

En esta última figura observamos los esfuerzos de los tres aceites a una temperatura de 110°C, el aceite de palma con un esfuerzo de 114 (Pa) es superior en un 1.32 % al esfuerzo del aceite de jatropha que tiene un esfuerzo final de 112.56 (Pa), increíblemente el aceite de palmiste tiene un esfuerzo de 32.1 (Pa) que es 71.85 %, menor al aceite de palma y 71.47% menos al aceite de jatropha.

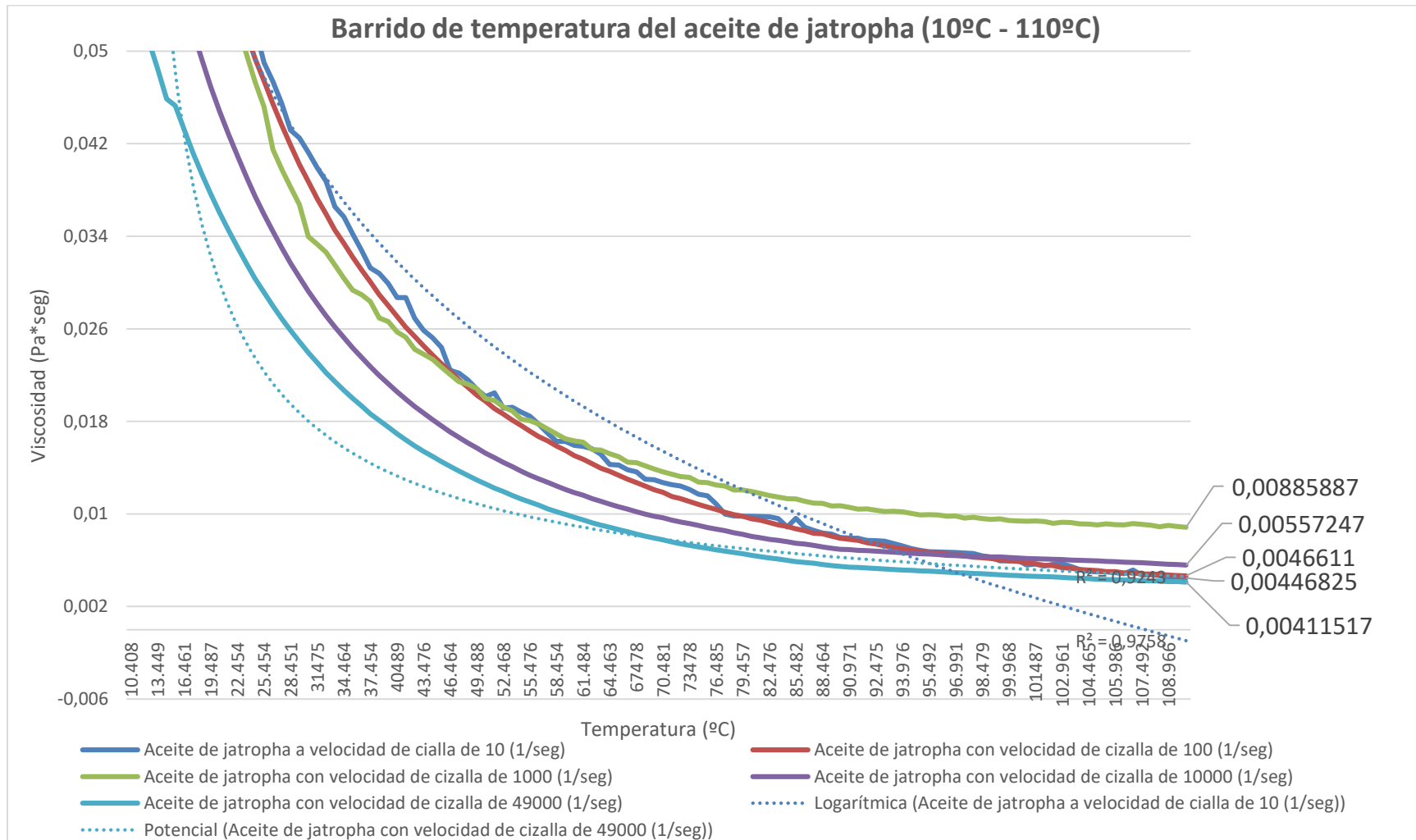
**Tabla 12.**

*Esfuerzo de los aceites de jatropha, palma y palmiste, a 110°C.*

Aceite	Esfuerzo (Pa)	Porcentaje de incremento %	Porcentaje de incremento %
Palma	114	1,31	
Jatropha	112,51	71,47	
Palmiste	32,10		71,84

En esta última figura observamos los esfuerzos de los tres aceites a una temperatura de 110°C, el aceite de palma con un esfuerzo de 114 (Pa) es superior en un 1.32 % al esfuerzo del aceite de jatropha que tiene un esfuerzo final de 112.56 (Pa), increíblemente el aceite de palmiste tiene un esfuerzo de 32.1 (Pa) que es 71.85 %, menor al aceite de palma y 71.47% menos al aceite de jatropha.

### 3.4.2 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de piñón, con una temperatura inicial de 10°C y una temperatura final de 110°C.



**Figura 33.** Variación del comportamiento del aceite de jatropha en los ensayos de barrido de temperatura (10°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.

En la figura observamos todos los ensayos de barrido de temperatura del aceite de jatropha a diferentes velocidades de cizalla. La temperatura inicial de cada barrido es de 10°C, y la temperatura final es de 110°C. Cada ensayo es realizado a diferente velocidad de cizalla 10, 100, 1000, 10000, 49000 (1/seg), respectivamente.

Ilustrativa mente se puede observar en la figura 31, los ensayos de barrido de temperatura a velocidades de cizalla bajas (10 1/seg y 100 1/seg), presentan un nivel de irregularidades en su comportamiento, estas irregularidades se atenúan a medida que la velocidad de cizalla del ensayo aumenta.

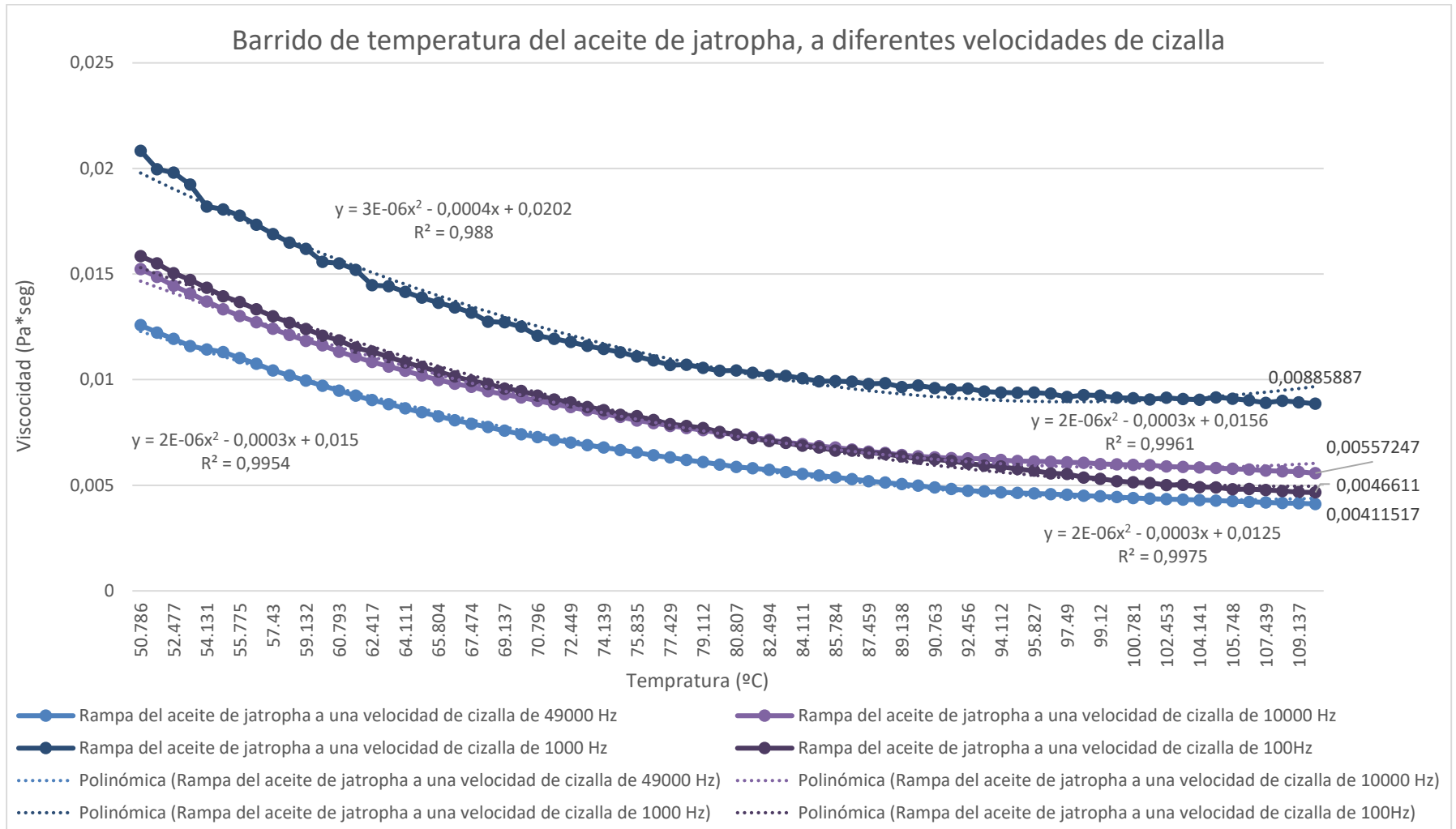
**Tabla 13.**

*Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo.*

Barrido de temperatura	Viscosidad inicial	Temperatura inicial	Viscosidad final	Temperatura final	Porcentaje de disminución
(1/seg)	(Pa*seg)	(°C)	(Pa*seg)	(°C)	(%)
10	0,102855	10	0,00446825	110	95,66
100	0,0966145	10	0,00885887	110	90,83
1000	0,130625	10	0,0046611	110	96,43
10000	0,0745257	10	0,00557247	110	92,52
490000	0,0562795	10	0,00411517	110	92,69

En todos los casos de los ensayos de barrido de temperatura del aceite de jatropha a diferentes velocidades de cizalla se observa que la viscosidad disminuye al menos un 90%, la viscosidad inicial de la viscosidad final.

### 3.4.2.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de piñón, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C.



**Figura 34.** Variación del comportamiento del aceite de jatropha en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.



En la figura 34 se observa el comportamiento del aceite de jatropha en los diferentes ensayos de barrido de temperatura, se toma como referencia inicial la temperatura de 50°C, ya que es la temperatura a la cual todos los aceites se encuentran en un mismo estado físico.

En la gráfica se analizan todos los ensayos de barrido de temperatura, excepto el ensayo realizado a 10 (1/seg), este no fue analizado ya que presenta una estructura irregular con cambios muy bruscos en su gráfica.

Las curvas que más asemejan su comportamiento son las que se representa el ensayo a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg) y a una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg). Se selecciona cinco puntos aleatorios y se comprueba que existe una variación promedio de 22.4 % de la disminución de la viscosidad entre el ensayo realizado a 1000 (1/seg) y a 49000(1/seg).

**Tabla 14.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 49000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 10000 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00775497	0,00966266	70,8	19,74
2	0,00641778	0,00806689	80,4	20,44
3	0,00546512	0,00695078	90,4	21,37
4	0,00466999	0,006199	100,4	24,67
5	0,00411517	0,00557247	109,9	26,15

La lógica de los ensayos indicaría que a medida que aumenta la velocidad de cizalla en el barrido de temperatura del aceite de jatropha, este disminuye su viscosidad proporcional mente. Esta lógica solo se cumple para los ensayos de 10000 y 49000 (1/seg). El comportamiento de los otros ensayos realizados a velocidades de cizalla de 1000 (1/seg) y 100 (1/seg), presentan un curva similar, pero sus valores no cumplen con los parámetros esperados.

La rampa del ensayo del aceite de jatropha a 1000 (1/seg), presenta valores más viscosos a lo largo de todo el ensayo, por el contrario la rampa del ensayo a 100 (1/seg), tiene valores que se asemejan a los del ensayo realizado a 10000 (1/seg) y valores de viscosidad mucho menor a la rampa de 1000 (1/seg).

**Tabla 15.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg)*

Nº	Velocidad de cizalla a 1000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 100 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de viscosidad superior %
1	0,0131707	0,00925092	70	29,76
2	0,0113013	0,00740176	80	34,51
3	0,00992877	0,00622918	90	37,26
4	0,00927386	0,00514117	100	44,56
5	0,00885887	0,0046611	110	47,38

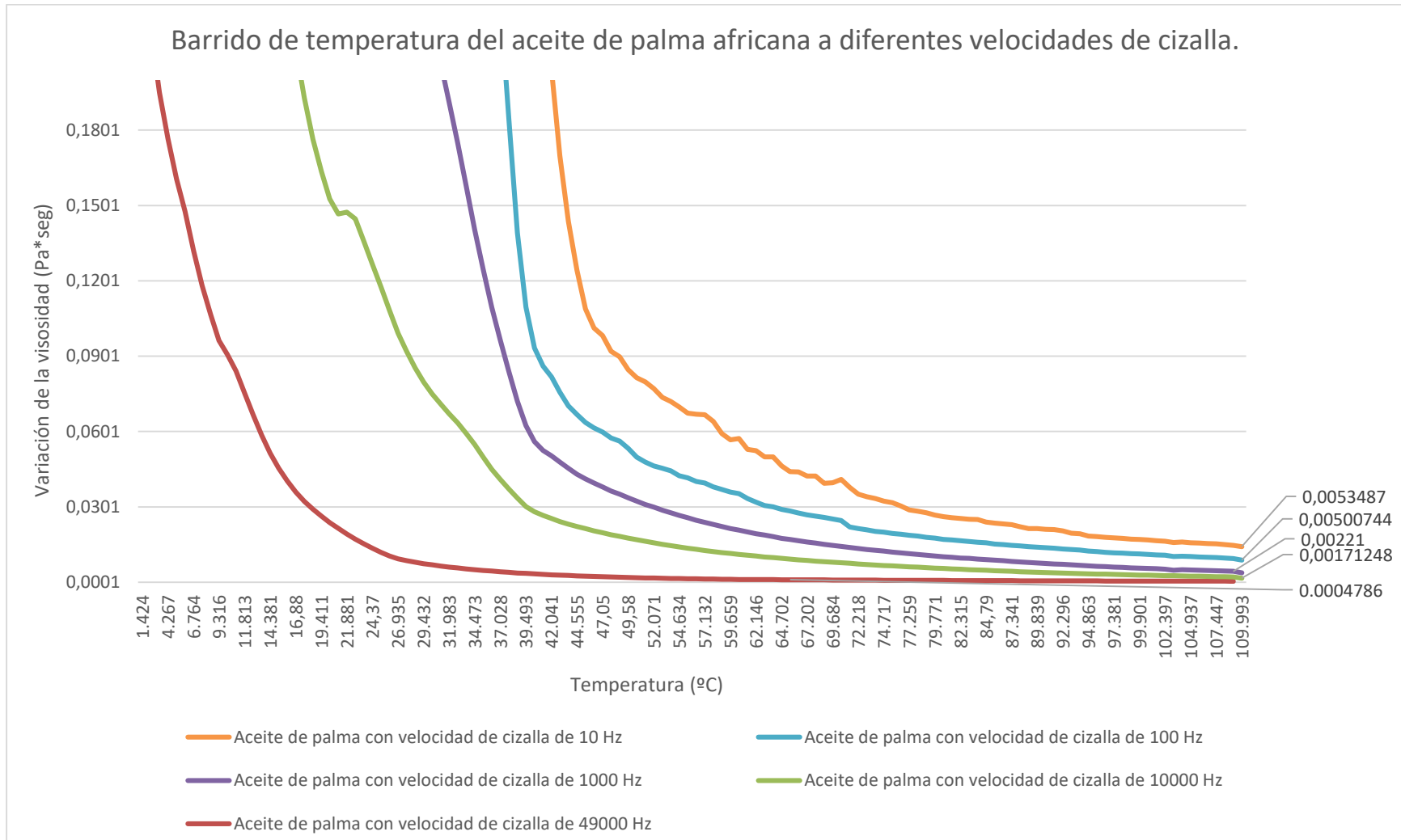
De la misma manera que la deducción de la tabla 15, en esta tabla se muestra que la viscosidad del aceite sometido a una velocidad de cizalla de 1000 (1/seg), es muy superior a la rapa con velocidad de 100 (1/seg) con un promedio de 38.7 %. Igual mente en la tabla 20 se observa que el aceite sometido a una velocidad de cizalla a 100 (1/seg), posee casi los mismos valores de viscosidad, incluso valores más bajos al ensayo a una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg).

**Tabla 16.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de jatropha a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 10000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 100 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de viscosidad superior %
1	0,00966266	0,00925092	70	4,26
2	0,00806689	0,00740176	80	8,25
3	0,00695078	0,00622918	90	10,38
4	0,006199	0,00514117	100	17,06
5	0,00557247	0,0046611	110	16,35

### 3.4.3 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palma africana, con una temperatura inicial de 1°C y una temperatura final de 110°C.



**Figura 35.** Variación del comportamiento del aceite de palma en los ensayos de barrido de temperatura (1°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.

En la figura 35 se describe el comportamiento del barrido de temperatura del aceite de palma a diferentes velocidades de cizalla, con una temperatura inicial de 1°C y una temperatura final de 110°C. Gráficamente se puede visualizar que las rampas del aceite antes de la temperatura de 50°C tienen una disminución muy brusca y casi lineal en su viscosidad, esto se debe que a estas temperaturas el aceite no se encuentra en estado líquido completamente, posee una textura pastosa. A partir de los 50°C su comportamiento es el esperado, una disminución gradual de su viscosidad.

En el aceite de palma si se cumple la lógica que cada vez que la velocidad de cizalla aumenta en cada ensayo de barrido de temperatura, la viscosidad disminuye así que la gráfica de barrido de temperatura a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg) representa los valores más bajos de viscosidad.

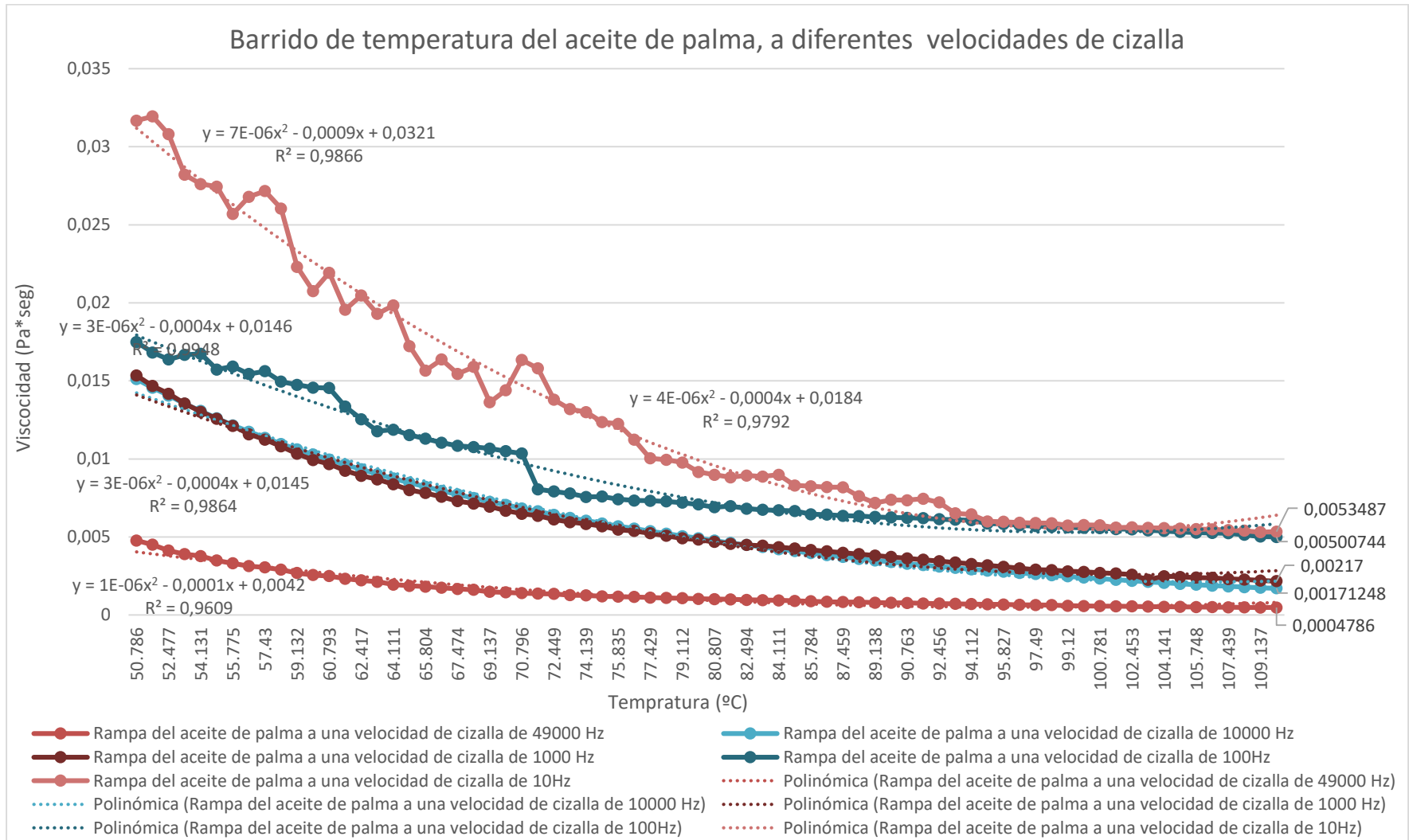
En la tabla 17 se analizan las viscosidades iniciales y finales del aceite de palma sometido a los barridos de temperatura a diferentes velocidades de cizalla, cabe recalcar que la viscosidad del aceite de palma no supera una disminución de la viscosidad más del 90% como era el caso del aceite de jatropha.

**Tabla 17.**

*Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo.*

Barrido de temperatura (1/seg)	Viscosidad inicial (Pa*seg)	Temperatura inicial (°C)	Viscosidad final (Pa*seg)	Temperatura final (°C)	Porcentaje de disminución (%)
10	0,0316733	1	0,0053487	110	83,11
100	0,0174837	1	0,0050074	110	71,36
1000	0,01534	1	0,00217	110	85,85
10000	0,0151152	1	0,0017125	110	88,67
490000	0,0019028	1	0,0004786	110	74,85

### 3.4.3.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palma africana, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C.



**Figura 36.** Variación del comportamiento del aceite de palma en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.

En la figura 36 se observa todos los ensayos de barrido de temperatura del aceite de palma, analizados a partir de 50°C, ya que a esta temperatura el aceite de palma ya se encuentra en forma líquida, y la temperatura final de 110°C, que es la ya establecida para estos ensayos.

La rampa que es sometida a una velocidad de 49000 (1/seg) es la que presenta los valores más bajos de viscosidad, seguida por las rampas de 10000 (1/seg) y 1000 (1/seg), estas dos rampas presentan valores muy similares. Y finalmente tenemos la rampa del aceite de palma 100 (1/seg) y de 10 (1/seg), estas dos rampas ya presentan valores similares e irregulares.

**Tabla 18.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 49000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 10000 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00174545	0,00683532	70	74,46
2	0,00117737	0,00476515	80	75,29
3	0,00082284	0,00329383	90	75,02
4	0,00060796	0,00233167	100	73,93
5	0,00048474	0,00174333	110	72,19

En la tabla 18 se analizan cinco puntos aleatorios de la rampa de 49000 (1/seg) y 10000 (1/seg) del aceite a diferentes temperaturas, como resultado se obtuvo que la rampa desarrollada a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg) es un promedio de 74.18% menos viscosa.

Se realiza la misma comparación para todas las rampas de barrido de temperatura.

**Tabla 19.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 10000 (1/seg) y a 1000(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 10000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 1000 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00683532	0,00649	70	-5,30
2	0,00476515	0,00469	80	-1,67
3	0,00329383	0,00363	90	9,26
4	0,00233167	0,00270	100	13,64
5	0,00174333	0,00217	110	19,66

En la tabla 19 y en la figura 36 se analizan las rampas de barrido de temperatura con velocidades de cizalla de 10000 (1/seg) y 1000 (1/seg) se puede observar claramente que el comportamiento de la viscosidad es casi el mismo, solo en la parte final de la rampa se puede observar que la viscosidad del aceite de palma con velocidad de cizalla de 10000 (1/seg) es inferior un promedio de 15% a la viscosidad del aceite sometido a 1000 (1/seg).

Las rampas realizadas a 100 (1/seg) y a 10 (1/seg), presentan irregularidades muy notorias además una viscosidad un poco más alejada de las analizadas anterior mente, por la gráfica se puede deducir que a bajas velocidades de cizalla el aceite no se comporta uniformemente.

**Tabla 20.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 1000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 100 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00649	0,0103482	70	37,27
2	0,00469	0,00690694	80	32,14
3	0,00363	0,006225316	90	41,69
4	0,00270	0,00556333	100	51,47
5	0,00217	0,00500744	110	56,66

En la tabla 20 se observa que el aceite a la velocidad de 1000 (1/seg), en algunos puntos llega a ser menos viscoso hasta en más del 50% del aceite a la velocidad de cizalla de 100(1/seg).

**Tabla 21.**

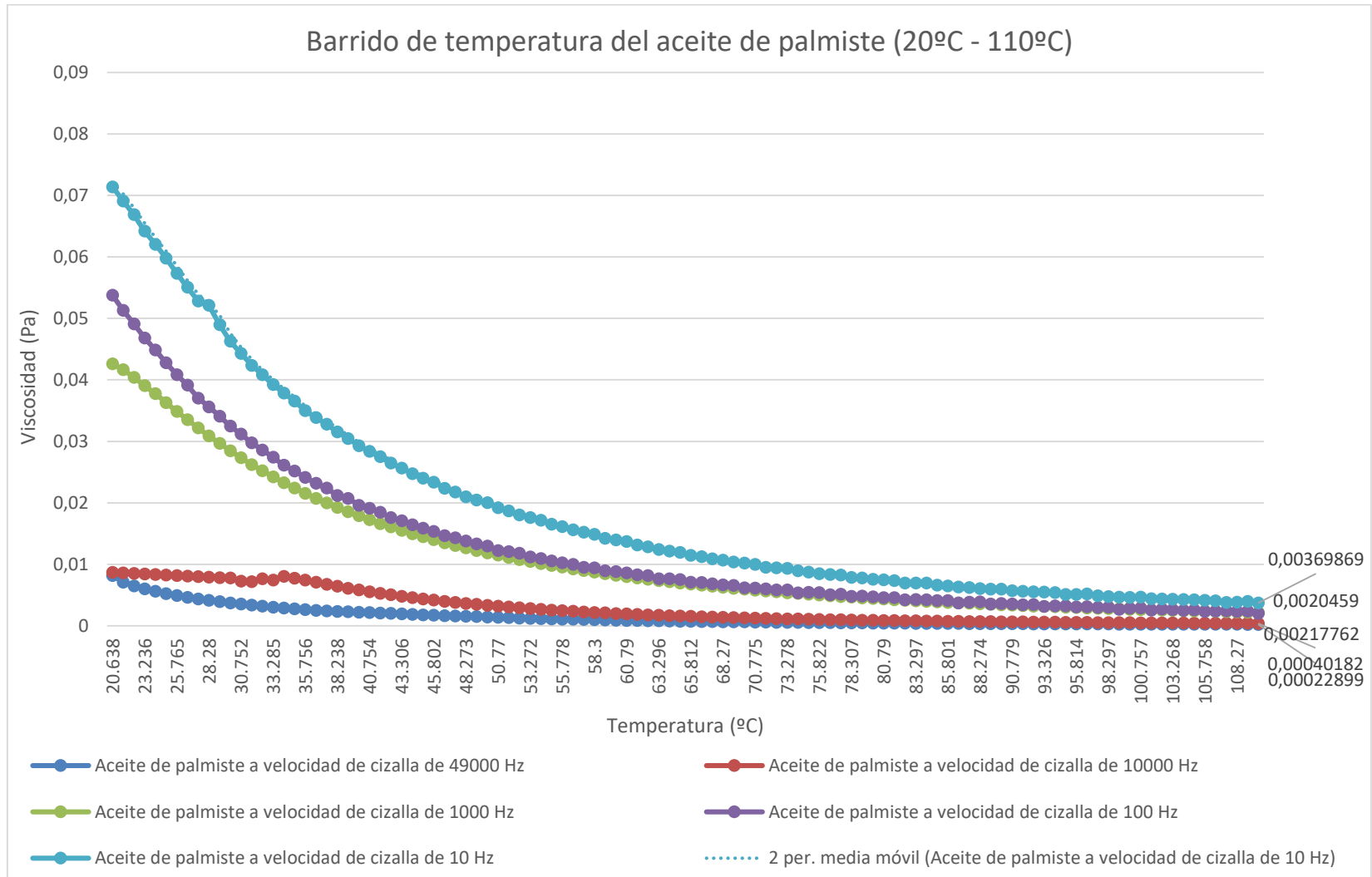
*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palma a 100 (1/seg) y a 10(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 100 (1/seg)	Velocidad de cizalla 10 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,0103482	0,0163393	70	36,67
2	0,00690694	0,00898935	80	23,17
3	0,006225316	0,00735657	90	15,38
4	0,00556333	0,0057537	100	3,31
5	0,00500744	0,0053487	110	6,38

Por último tenemos esta tabla que compara las viscosidades del aceite de palma a velocidades de cizalla de 100 (1/seg) y 10 (1/seg), aquí se observa que el aceite sometido a una velocidad de 10 (1/seg) es más viscoso que el sometido a 100 (1/seg), comprobando que para el aceite de palma si cumple el orden supuesto. A mayor velocidad de cizalla el aceite presenta una disminución gradual en su viscosidad.



**3.4.4 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palmiste africana, con una temperatura inicial de 10°C y una temperatura final de 110°C.**



**Figura 37.** Variación del comportamiento del aceite de palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (20°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.

En la figura 37 observamos el barrido de temperatura del aceite de palmiste con una velocidad inicial de 20°C y final de 110°C, a las velocidades de cizalla ya conocidas.

A temperaturas inferiores a 40°C, el aceite de palmiste se solidifica, por esta razón se inicia los ensayos a 20°C para que con el aumento progresivo de la temperatura el aceite se diluya progresivamente.

La gráfica nos demuestra que el aceite de palmiste es el único aceite que se comporta de manera coherente, sus barridos de temperatura disminuyen a medida que aumenta la velocidad de cizalla en cada ensayo.

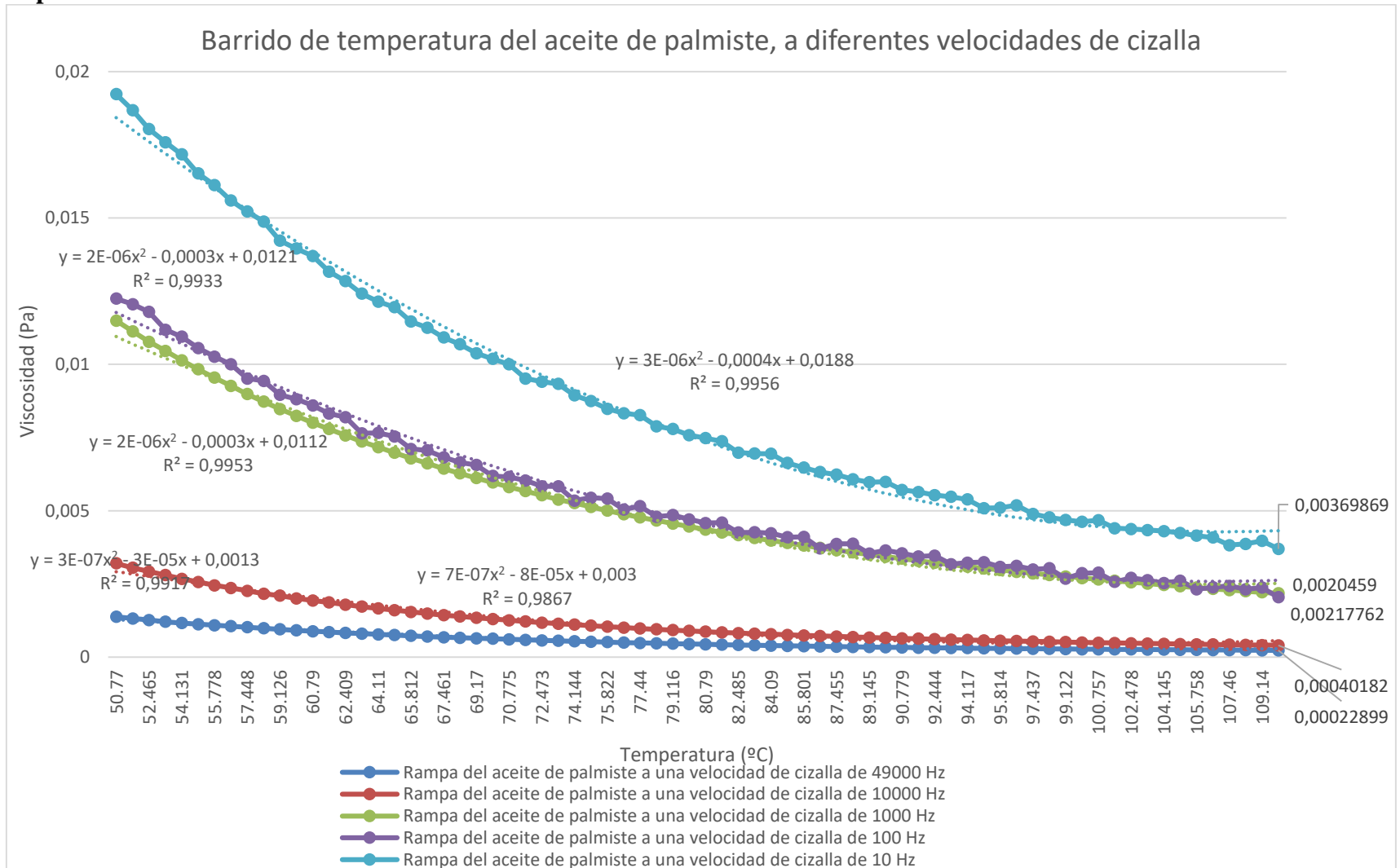
**Tabla 22.**

*Disminución de la viscosidad a través del barrido de temperatura para cada ensayo del aceite de palmiste.*

Barrido de temperatura (1/seg)	Viscosidad inicial (Pa*seg)	Temperatura inicial (°C)	Viscosidad final (Pa*seg)	Temperatura final (°C)	Porcentaje de disminución (%)
10	0,0714091	20	0,0036987	110	94,82
100	0,0537736	20	0,0020459	110	96,20
1000	0,0426225	20	0,0021776	110	94,89
10000	0,008685632	20	0,0004018	110	95,37
490000	0,00818944	20	0,000229	110	97,20

En la tabla 22 se compara la viscosidad inicial y final del aceite después de la elaboración de cada rampa de barrido de temperatura. El aceite de palmiste disminuye en promedio su viscosidad en un 95.7%

### 3.4.4.1 Ensayo de barrido de temperatura al aceite de palmiste africana, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C.



**Figura 38.** Variación del comportamiento del aceite de palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a diferentes velocidades de cizalla.

En la figura 38 se toma como temperatura inicial 50°C y final de 100°C, de la misma manera que se ha realizado el análisis de las anteriores rampas de temperatura. Todas la rampas tienen un oren descendente en los valores de su viscosidad, la rampa con velocidad de cizalla de 49000 (1/seg) tiene viscosidad menor a la rampa con velocidad de cizalla de 10000(1/seg) y esta tiene valores de viscosidad menores a los valores de la rampa de barrido de temperatura a velocidad de cizalla de 1000 (1/seg), y así sucesivamente hasta llegar a la rampa de 10 (1/seg).

Como se ha estado trabajando, se toma cinco puntos aleatorios de cada rampa a diferente temperatura y se compara la viscosidad de ambas rampas de diferentes velocidades de cizalla en dicho punto.

**Tabla 23.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 49000 (1/seg) y a 10000(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 49000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 10000 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00060753	0,00125593	70	51,63
2	0,00043506	0,00086947	80	49,96
3	0,00032797	0,00063913	90	48,68
4	0,00026824	0,00049166	100	45,44
5	0,00022899	0,00040182	110	43,01

En la tabla 23 se observa que el aceite de palmiste sometido a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg) es en promedio 47.7 % menos viscoso que la rampa a 10000 (1/seg)

**Tabla 24.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 10000 (1/seg) y a 1000(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla 10000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 1000 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00125593	0,00580918	70	78,38
2	0,00086947	0,00435515	80	80,04
3	0,00063913	0,00336176	90	80,99
4	0,00049166	0,00265371	100	81,47
5	0,00040182	0,00217762	110	81,55

En la tabla 24 se observa que el aceite de palmiste sometido a una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg) es en promedio 80.48 % menos viscoso que la rampa a 1000 (1/seg).

**Tabla 25.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 1000 (1/seg) y a 100(1/seg)*

Nº	Velocidad de cizalla a 1000 (1/seg)	Velocidad de cizalla 100 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00580918	0,00615337	70	5,59
2	0,00435515	0,0045778	80	4,86
3	0,00336176	0,00354751	90	5,24
4	0,00265371	0,00288129	100	7,90
5	0,00217762	0,0020459	110	-6,44

La tabla 25 nos muestra que la viscosidad del aceite de palmiste entre los barridos de temperatura a 1000 (1/seg) y 100 (1/seg) tienen una diferencia mínima, el aceite a 100 (1/seg) es un promedio de 3.43% más viscoso que el aceite sometido a una cizalla de 1000 (1/seg).

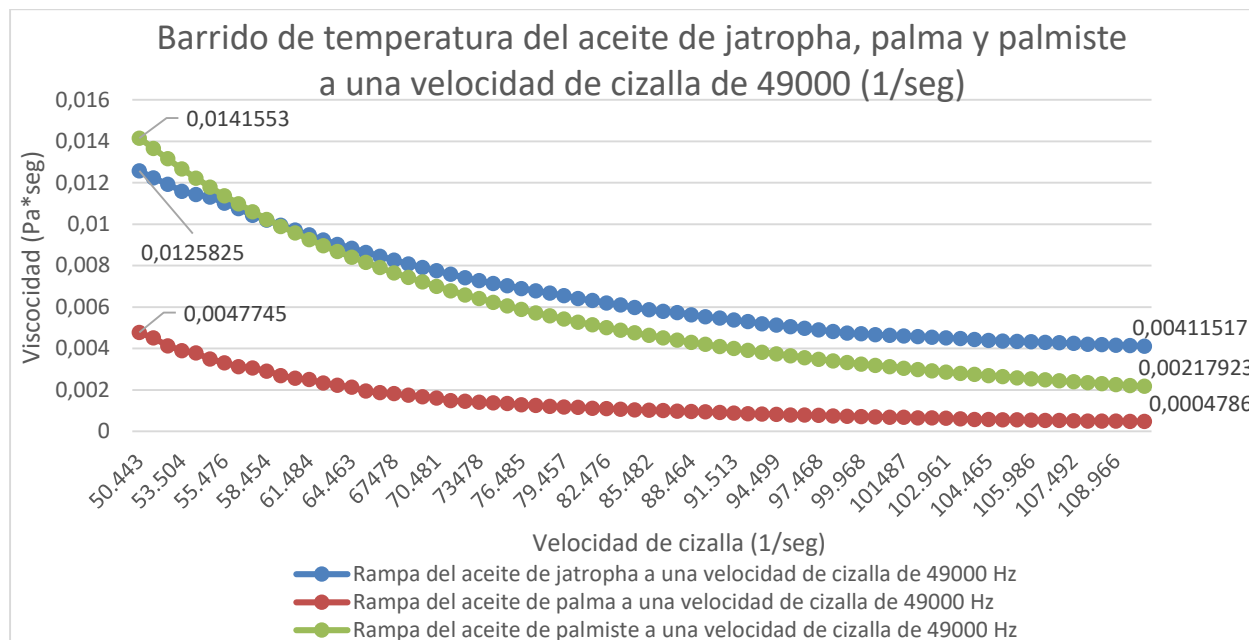
**Tabla 26.**

*Diferencia entre la viscosidad del aceite de palmiste a 100 (1/seg) y a 10(1/seg).*

Nº	Velocidad de cizalla a 100 (1/seg)	Velocidad de cizalla 10 (1/seg)	Temperatura °C	Porcentaje de disminución %
1	0,00615337	0,0100014	70	38,47
2	0,0045778	0,00747893	80	38,79
3	0,00354751	0,00571077	90	37,88
4	0,00288129	0,00467572	100	38,38
5	0,0020459	0,00369869	110	44,69

La última tabla comparativa del aceite de palmiste nos muestra que el aceite sometido a una velocidad de cizalla de 100 (1/seg) es en promedio un 39.64 % que el aceite a 10 (1/seg).

### 3.4.4.2 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg).

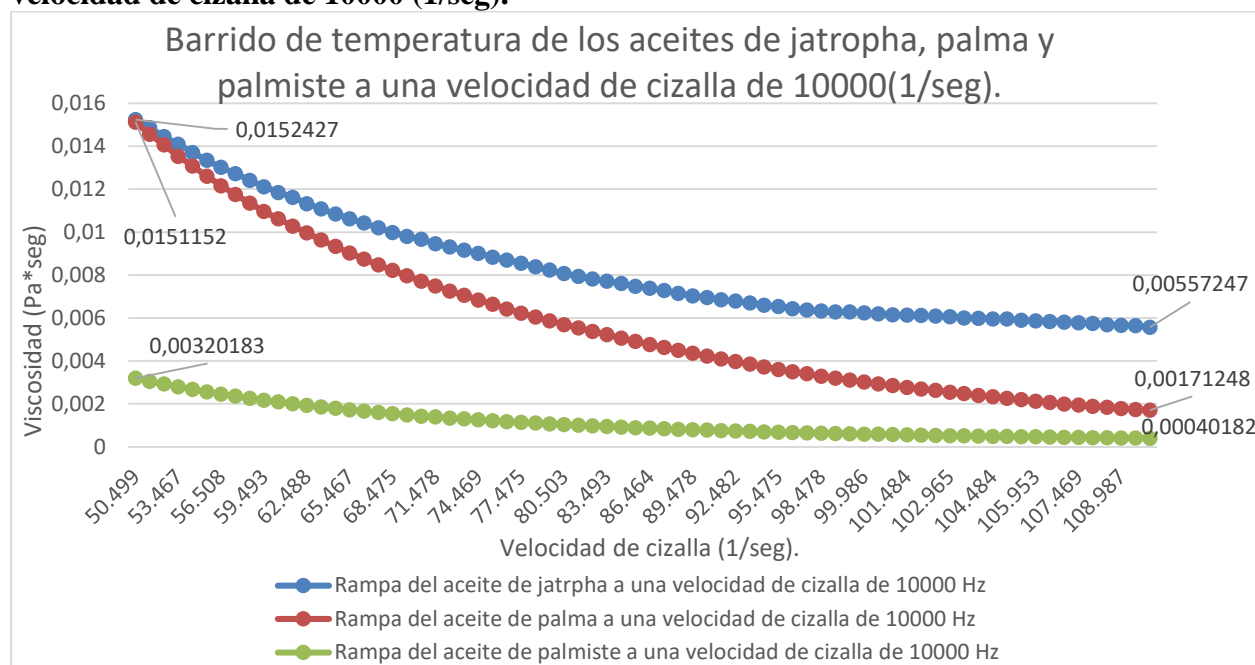


**Figura 39.** Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 49000 (1/seg).

En esta figura se pueden comparar el comportamiento de los tres aceites sometidos a una velocidad de cizalla de 49000 (1/seg). Se tomará como temperatura inicial 50°C, ya que a esta temperatura los tres aceites presentan las mismas condiciones físicas. En el rango de temperatura analizado el aceite que sufre menos disminución de su viscosidad es el aceite de jatropha su viscosidad disminuye un 67.30%, el aceite de palma disminuye su viscosidad en un 84.60% y el palmiste disminuye en un 89.98 %.

Al final del barrido de temperatura el aceite de jatropha es 47.04% más viscoso que el aceite de palmiste y 88.37% más viscoso que el aceite de palma, mientras que el aceite de palmiste es 78.04% más viscoso que el aceite de palma.

### 3.4.4.3 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg).



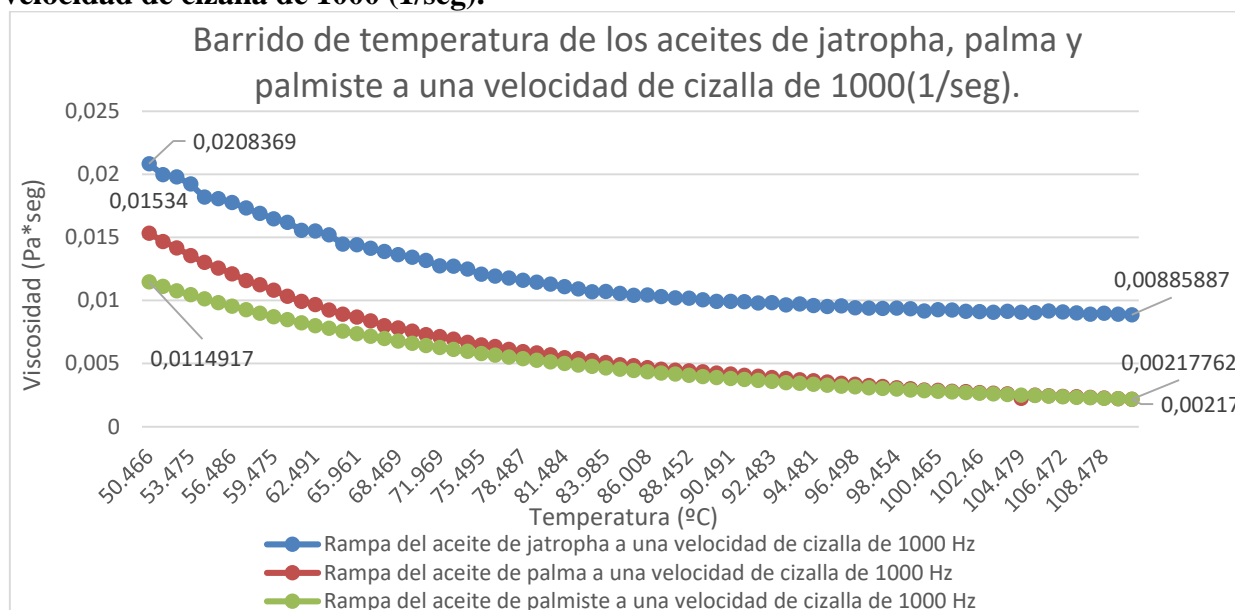
**Figura 40.** Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 10000 (1/seg).

A una velocidad de cizalla de 10000 (1/seg) la jatropha sigue siendo el aceite con mayor viscosidad seguida ahora por el aceite de palma y por último el de palmiste.

El aceite de palma reduce su viscosidad en un 88.67%, el aceite de palmiste reduce su viscosidad en un 87.45% y la jatropha ratifica que es el aceite que pierde menos propiedades viscosas al reducir esta propiedad máximo en un 63.44%, este análisis ocurre entre 50°C y 110°C a la velocidad de cizalla ya mencionada.

En el final de este ensayo, el aceite de jatropha posee una viscosidad 69.30% superior a la viscosidad de la palma y 92.79% al aceite de palmiste. Mientras que el aceite de palma tiene una viscosidad superior en 76.54% al aceite de palmiste

### 3.4.4.4 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 1000 (1/seg).



**Figura 41.** Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 1000 (1/seg).

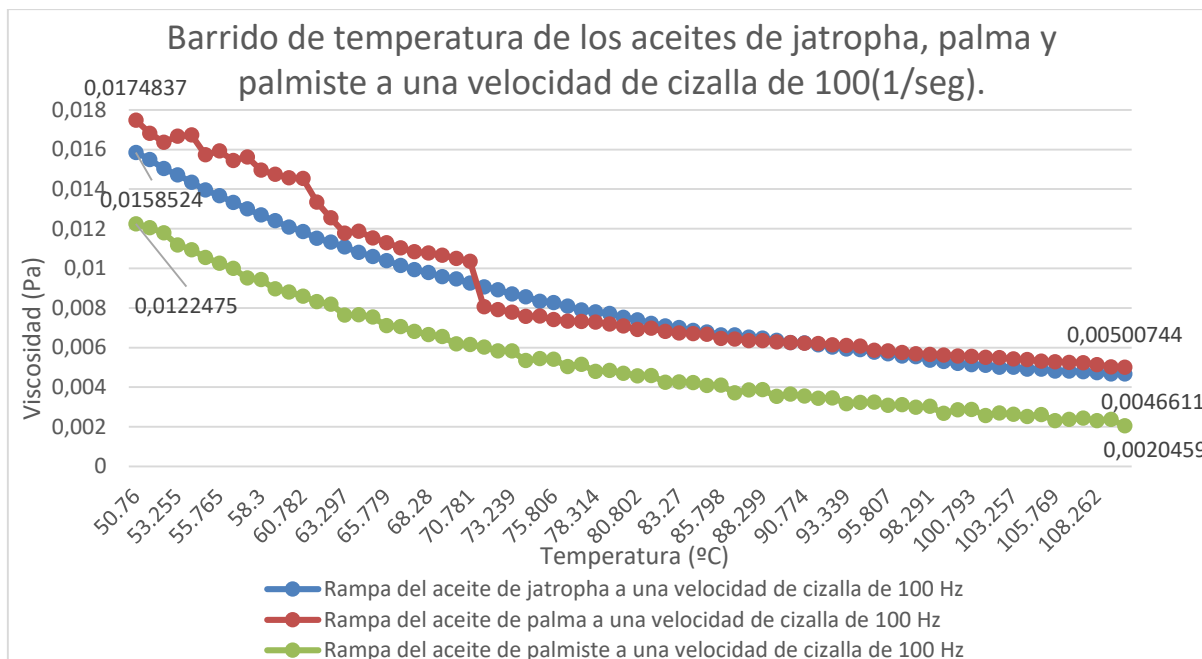
En la figura 41 el aceite de palma y el aceite de palmiste tienen un comportamiento muy similar en su viscosidad, mientras que la viscosidad del aceite de jatropha presenta la misma tendencia, que consiste en una disminución no tan drástica de su viscosidad.

En el rango de temperatura ya determinado la jatropha presenta una disminución de su viscosidad en un 57.48%, el palmiste en 81.12% mientras que la palma disminuye su viscosidad en 85.85% entre los puntos tomados a 50°C y 110°C.

La viscosidad de la jatropha a 110°C es 97.54% más viscosa que el aceite de palma y de palmiste y estos a esa temperatura tienen prácticamente la misma viscosidad.



### 3.4.4.5 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 100 (1/seg).



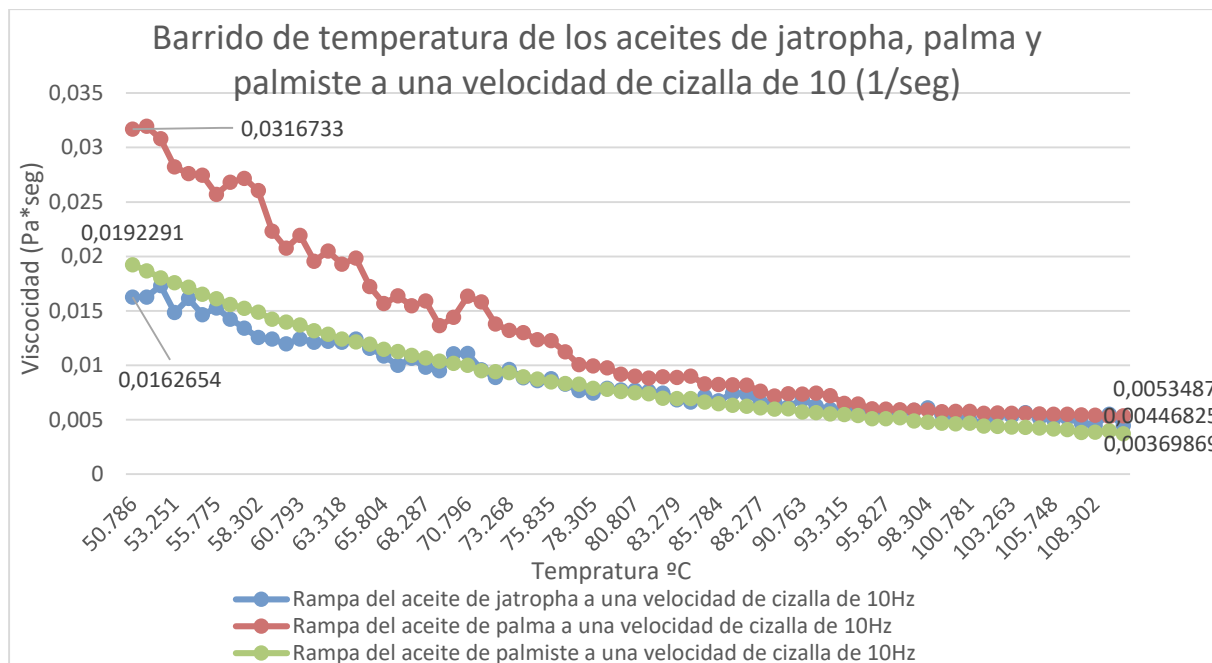
**Figura 42.** Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 100 (1/seg).

En el barrido de temperatura a 100 (1/seg) ya se percibe un comportamiento un poco irregular en el aceite de palma, el aceite de palmiste también presenta irregularidades pero estas son mínimas solo el aceite de jatropha se comporta de manera uniforme.

El comportamiento de los aceites es el mismo de los ensayos anteriores con la tendencia de la disminución de la viscosidad a lo largo de la rampa de temperatura. La jatropha disminuye en 70.60%, la palma disminuye un 71.36% y la viscosidad del palmiste disminuye en 83.30%

A la temperatura de 110°C el aceite de palma es 6.92% más viscoso que el aceite de jatropha y es 59.15% más viscoso que el aceites de palmiste, y por último el aceite de jatropha es 56.11% más viscoso que el aceite de palmiste.

### 3.4.4.6 Comparación de las rampas de temperatura de los aceites de jatropha, palma y palmiste, con una temperatura inicial de 50°C y una temperatura final de 110°C, a una velocidad de cizalla de 10 (1/seg).



**Figura 43.** Variación del comportamiento de los aceites de jatropha, palma y palmiste en los ensayos de barrido de temperatura (50°C -110°C) a velocidad de cizalla de 10 (1/seg).

A una velocidad de cizalla de 10(1/seg) los aceites tienen un comportamiento un poco irregular, pero de la misma manera sufren una disminución en su viscosidad, el aceite de palma disminuye un 83.12%, el palmiste disminuye un 80.77% su viscosidad, mientras que el aceite de jatropha varía en un 72.53%.

Analizando la viscosidad a 110°C, la palma tiene una viscosidad superior a la jatropha con un 16.47% y al palmiste con un 30.84%, claro está con irregularidades en la gráfica. El aceite de jatropha es un 17.23% más viscoso que el aceite de palmiste.

### **3.4.5 Ensayos de barrido de amplitud al aceite de jatropha, palma y palmiste.**

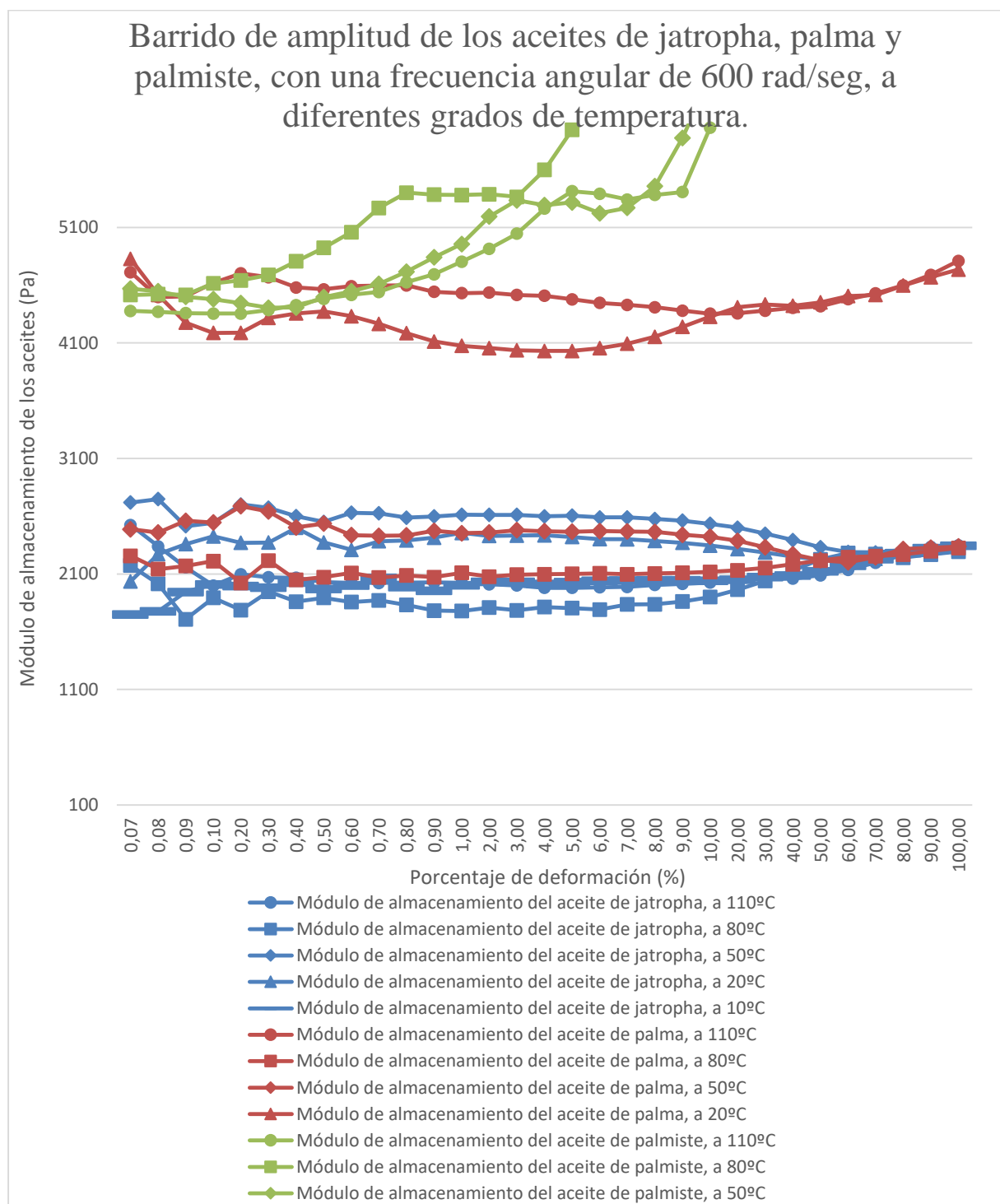
En momentos determinados el aceite de palma y de palmiste africano cambio su estructura física, cuando estos fueron sometidos a temperaturas inferiores a 40°C. Es este ensayo es realizado para determinar si el fluido cambia de estructura interna a sólida o tienen un comportamiento elástico. En el ensayo se ilustran dos gráficas, el módulo de almacenamiento  $G'$  y el módulo de pérdida  $G''$ . El módulo de almacenamiento representa el grado de comportamiento elástico es decir la energía que se almacena de forma reversible mediante fuerzas de restauración. Por el contrario el módulo de pérdida nos indica la cantidad de comportamiento viscoso, es decir la energía que se disipa irreversiblemente debido al flujo viscoso.

Estos dos módulos nos indican que tan “líquido” o que tan “sólido” es el comportamiento de la sustancia analizada.

Si el módulo de almacenamiento tiene valores más altos que el módulo de pérdida, el fluido tiene un comportamiento elástico, si sucede lo contrario el fluido tiene un comportamiento viscoso. Gráficamente estas líneas deben intersectarse para interpretar que existe un cambio de estado.

Cabe recalcar que se debe considerar el cambio de la estructura física del aceite de palma y del aceite de palmiste ocasionado por la disminución de la temperatura cuando esta disminuye de 40°C

### 3.4.5.1 Ensayo reológico, barrido de amplitud al aceite de jatropha, palma y palmiste con una frecuencia angular constante de 600 rad/seg, a diferentes temperaturas.



**Figura 44.** Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 600 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C).

Al realizar los ensayos de barrido de amplitud estos ensayos sorprendentemente en todas las gráficas el módulo de almacenamiento es superior al módulo de pérdida.

Esto supondría que el aceite tiene comportamiento viscoelástico y además tiene características de sólido más que características de fluido líquido.

Conocidos los ensayos de flujo estacionario y barrido de temperatura se puede afirmar que los aceites no son viscoelásticos.

Para esclarecer este fenómeno utilizamos el número de Deborah.

Este número adimensional es usado en reología para determinar cuán "fluido" es un material. Este se obtiene dividiendo el tiempo de respuesta para el tiempo de observación. (Rojas, María, & Jorge, 2012)

Si el número de Deborah es menor a 1 el fluido tiene un comportamiento líquido viscoso, si este número es mayor a 1, el fluido tiene un comportamiento sólido elástico.

$$De = \frac{\text{tiempo de respuesta (tiempo característico de la sustancia)}}{\text{tiempo de observación (tiempo del experimento)}}$$

El tiempo característico de la sustancia " $\lambda$ " se lo puede obtener dividiendo la viscosidad para el módulo predominante en el ensayo de amplitud.

$$\lambda = \frac{\eta}{G}$$

Se seleccionara 3 valores aleatorios del ensayo de barrido de amplitud a frecuencia de 600 rad/seg, y diferentes grados de temperatura del aceite de jatropha para determinar el número de Deborah, y así establecer el comportamiento de los aceites y analizar las gráficas.

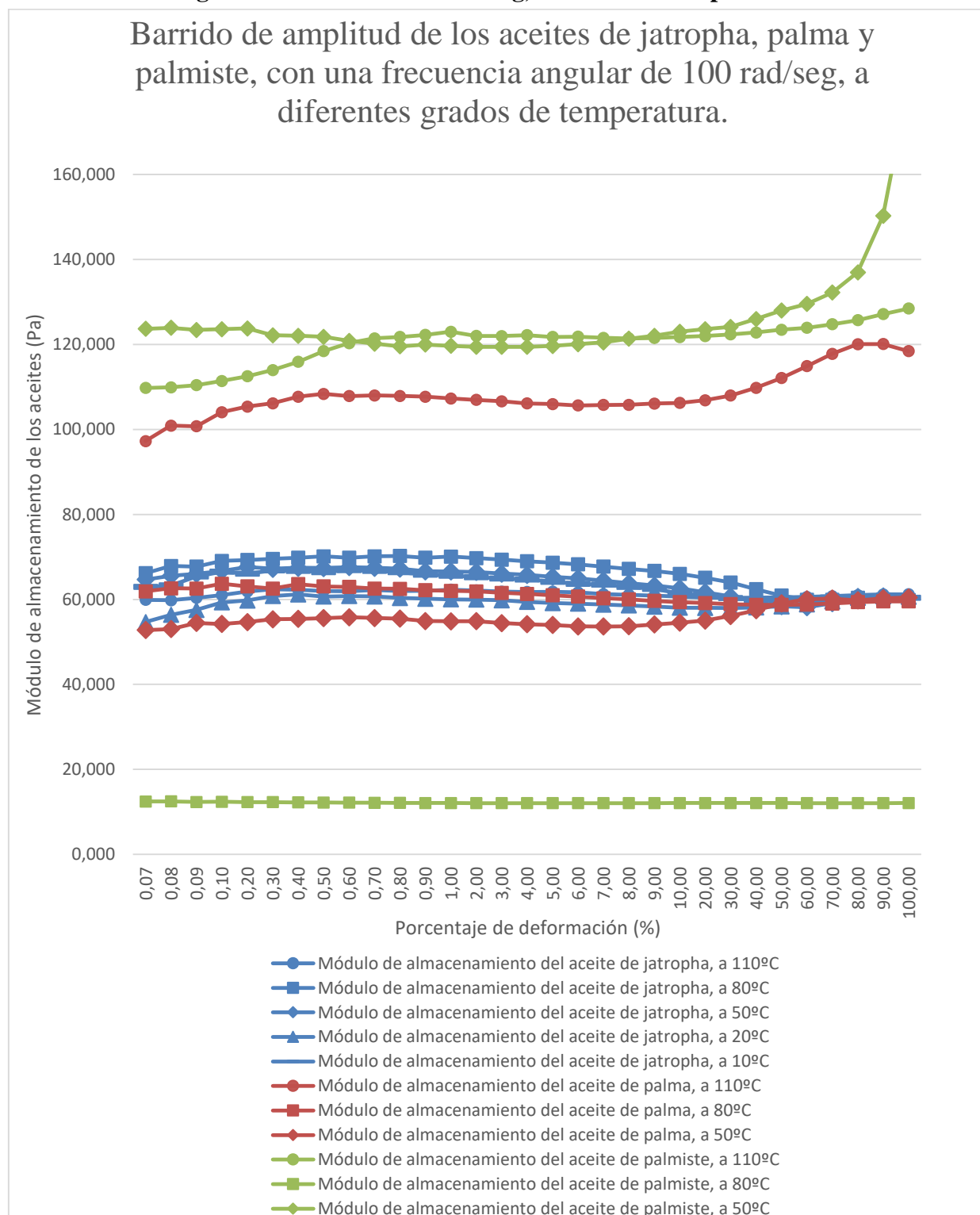
**Tabla 27.**

*Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de jatropha, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 600 rad/seg.*

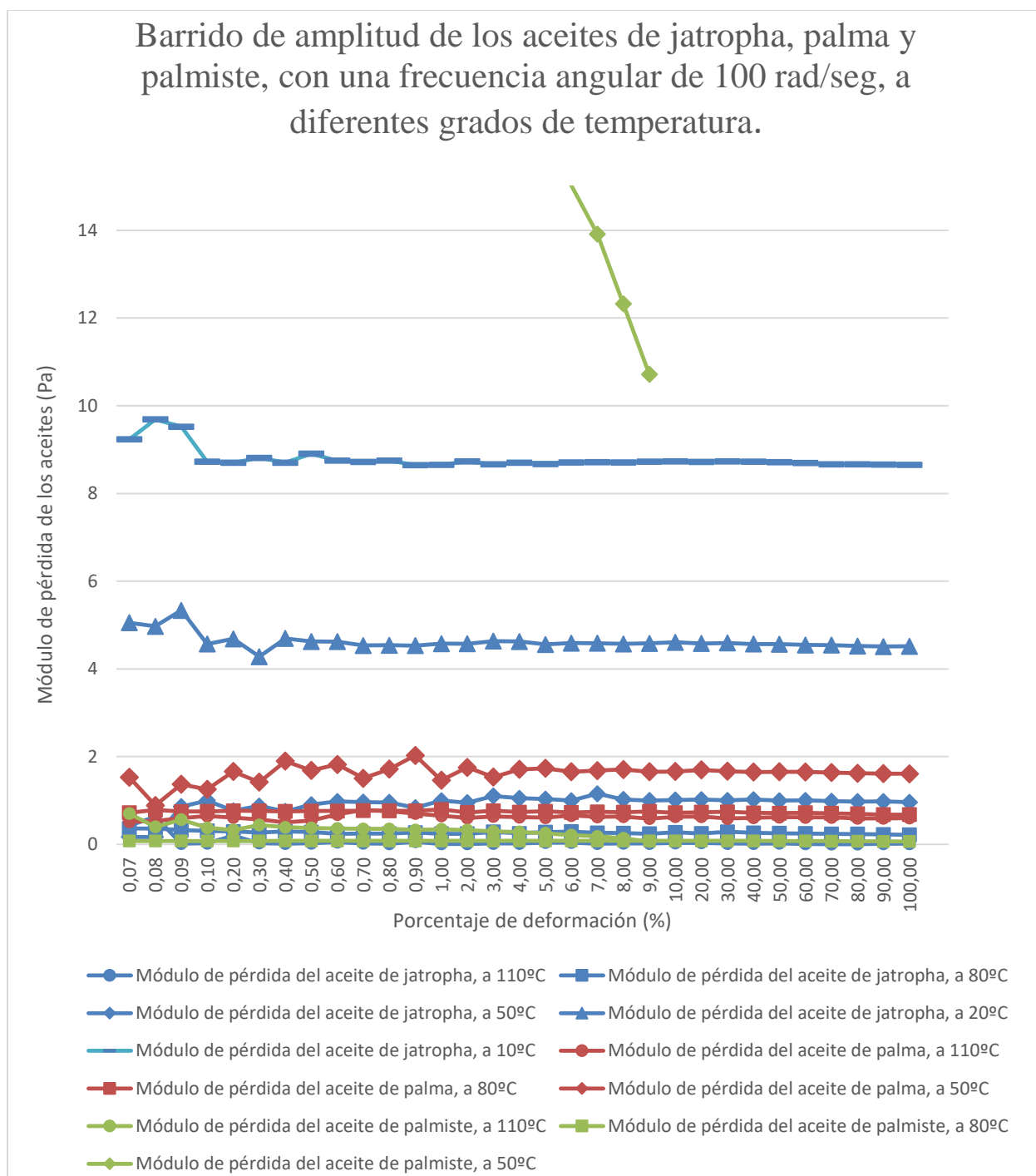
Módulo de almacenamiento	Viscosidad	Frecuencia angular	Tiempo de paso	Temperatura	Tiempo característico de la sustancia	Número de Deborah
Pa	Pa * seg	rad/s	seg	°C	seg	
2339,16	3,54	600	322,61	109,98	0,001513364	4,69E-06
2265,46	3,57	600	162,52	110,01	0,001575839	9,70E-06
2334,78	3,85	600	168,95	110,01	0,001650691	9,77E-06
1836,3	4,17	600	123,37	80,00	0,002270871	1,84E-05
1779,35	4,09	600	842,25	80,00	0,002298592	2,73E-06
1787,01	4,12	600	321,21	80,00	0,002305527	7,18E-06
2673,37	4,18	600	387,35	50,01	0,00156357	4,04E-06
2599,07	4,23	600	103,79	50,00	0,001627505	1,57E-05
2287,13	4,22	600	181,94	50,00	0,001845107	1,01E-05
2309,11	4,02	600	581,88	20,01	0,00174093	2,99E-06
2385,53	4,01	600	129,71	20,01	0,001680549	1,30E-05
2268,35	3,98	600	194,83	20,00	0,001754579	9,01E-06
2000,07	3,34	600	581,57	9,98	0,001669942	2,87E-06
2029,56	3,42	600	110,28	9,99	0,001685094	1,53E-05
2325,7	3,95	600	194,97	10,00	0,001698413	8,71E-06

En la tala 27 se selecciona tres datos aleatorios de cada ensayo de barrido de amplitud del aceite de jatropha con una frecuencia de 600 rad/seg, a diferentes temperaturas. El tiempo de paso es el tiempo del experimento y el tiempo característico se obtiene dividiendo la viscosidad para el módulo de almacenamiento. Como podemos observar el número de deborah es bastante menor a 1, esto sumado a los ensayos de flujo estacionario y barrio de temperatura confirma que el comportamiento del aceite es viscoso, el fluido se comporta como líquido.

### 3.4.5.2 Ensayo reológico, barrido de amplitud al aceite de jatropha, palma y palmiste con una frecuencia angular constante de 100 rad/seg, a diferentes temperaturas



**Figura 45.** Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de almacenamiento.



**Figura 46.** Barrido de amplitud del aceite de jatropa, palma y palmiste con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de pérdida.

En los ensayos de barrido de amplitud con una frecuencia angular de 100 rad/seg, se repite el mismo fenómeno. El módulo de almacenamiento posee valores elevados, en este caso ya



se denota el módulo de pérdida pero este presenta valores muy por debajo que los valores del módulo de almacenamiento.

Para analizar el número de Deborah, en esta oportunidad se selecciona el aceite de palma en el ensayo realizado de barrido de amplitud con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes grados de temperatura.

**Tabla 28.**

*Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de palma, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 100 rad/seg.*

Módulo de almacenamiento	Módulo de pérdida	Viscosidad	Frecuencia angular	Tiempo de paso	Temperatura	Tiempo característico de la sustancia	Número de Deborah
Pa	Pa	Pa * seg	rad/s	seg	°C	seg	
106,14	0,569309	0,6	100	385	110.031	0,005652911	1,47E-05
107	0,635909	0,59	100	163	110.013	0,005496361	3,38E-05
119	0,460298	0,596	100	169	110.01	0,005019962	2,97E-05
62,021	0,795052	0,62	100	84	80.005	0,00999663	1,19E-04
60,007	0,733374	0,615	100	130	80.005	0,010248787	7,90E-05
59,039	0,707532	0,62	100	182	79.999	0,010501462	5,77E-05
55,331	1,419	0,55	100	387	50.005	0,009940178	2,57E-05
54,424	1,534	0,52	100	971	49.987	0,009554678	9,84E-06
59,784	1,622	0,6	100	188	50	0,010036197	5,33E-05
290,11	157,28	3,24	100	91	20.003	0,011168024	1,23E-04
131,84	59,17	1,3	100	182	19.98	0,009860512	5,42E-05
118,97	27,72	1,15	100	234	19.996	0,00966614	4,13E-05
444.752,0	36272,6	140,75	100	26	10.007	0,000316469	1,24E-05
13.066,1	12651,9	215,24	100	143	9.992	0,016473163	1,15E-04
133,2	293,58	3,74	100	266	10.007	0,012739287	4,78E-05

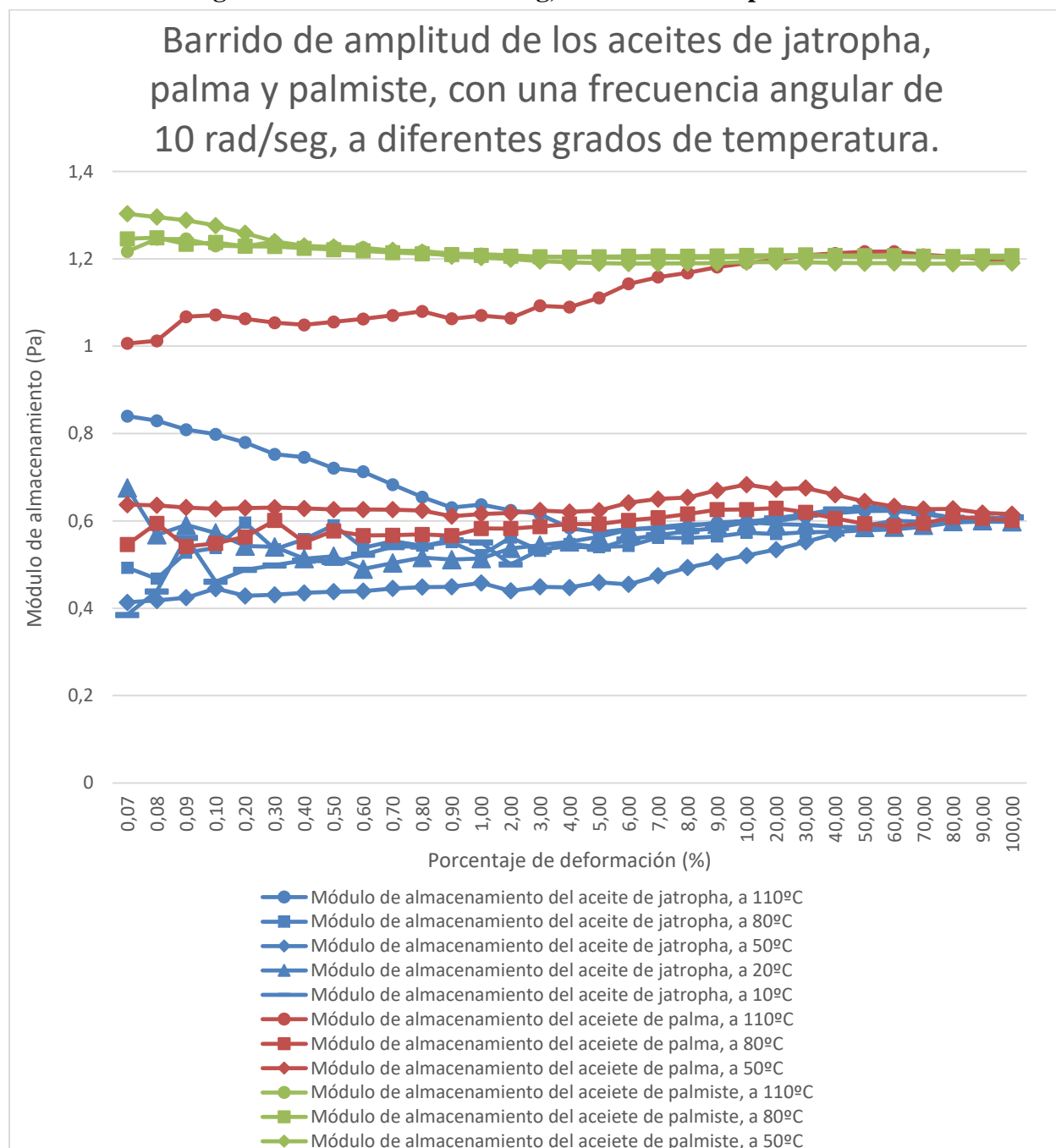
En la tabla 28, observamos el número de Deborah, correspondiente al aceite de palma africana con frecuencia angular de 100 rad/seg, a diferentes grados de temperatura.

Este número vuelve a ser inferior a 1, por tal motivo el aceite de palma tiene un comportamiento viscoso. Se repite el mismo fenómeno, el módulo de almacenamiento posee

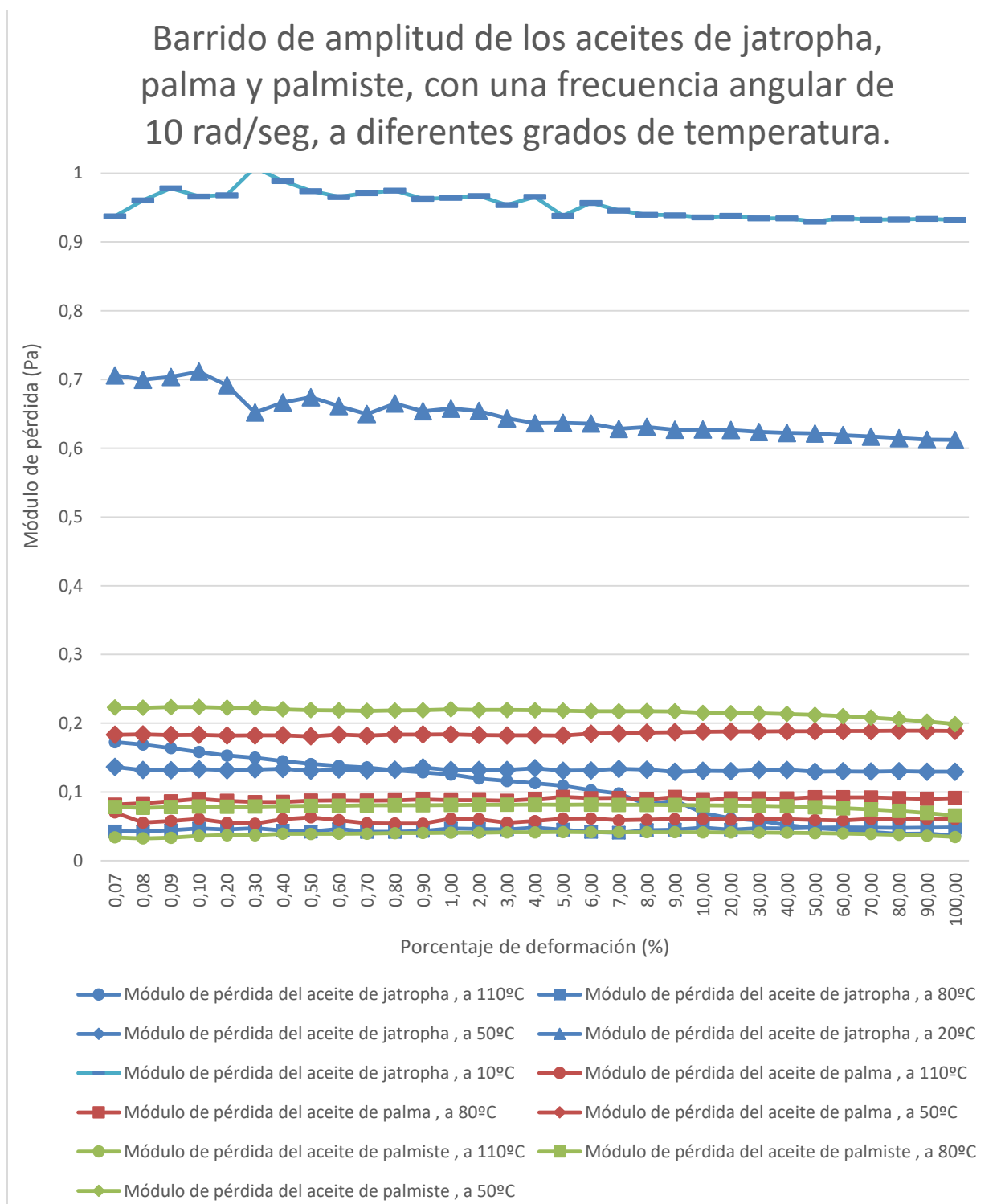
valores elevados, en este caso ya se denota el módulo de pérdida pero este presenta valores muy por debajo que los valores del módulo de almacenamiento.

La razón por la cual en los ensayos de barrido de amplitud con frecuencias angulares de 600 rad/seg y 100 rad/seg presentan módulos de almacenamientos con valores elevados sin ser fluidos viscoelásticos se debe a que el fluido al no ser fluido viscoelástico y ser sometido a ensayos con altas frecuencias angulares, sobre carga de energía al fluido para lograr dicha deformación, esta energía al no poder ser disipada en su totalidad, queda almacenada en la estructura del aceite lo que se refleja en las gráficas de barrido de amplitud. (Luis, 2015)

### 3.4.5.3 Ensayo reológico, barrido de amplitud al aceite de jatropha, palma y palmiste con una frecuencia angular constante de 10 rad/seg, a diferentes temperaturas



**Figura 47.** Barrido de amplitud del aceite de jatropha, palma y palmiste con frecuencia angular de 10 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de almacenamiento.



**Figura 48.** Barrido de amplitud del aceite de jatropa, palma y palmiste con frecuencia angular de 10 rad/seg, a diferentes temperaturas (°C). Módulo de pérdida.

En los ensayos de barrido de amplitud con frecuencia angular de 10 rad/seg ya se nota una paridad en los valores del módulo de almacenamiento y del módulo de pérdida.

De la misma forma se determina el número de Deborah para establecer el comportamiento del fluido. Nuevamente se analizará el aceite de jatropha ya que este presenta menos diferencia numérica entre el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida.

**Tabla 29.**

*Parámetros analizados del barrido de amplitud del aceite de jatropha, a diferentes temperaturas y frecuencia angular de 10 rad/seg.*

Módulo de almacenamiento	Módulo de pérdida	Viscosidad	Frecuencia angular	Tiempo de paso	Temperatura	Tiempo característico de la sustancia	Número de Deborah
Pa	Pa	Pa * seg	rad/s	seg	°C	seg	
0,637336	0,1253998	0,09	10.001	872,82	110.007	0,141212798	1,62E-04
0,587166	0,0819091	0,077	10.001	134,63	109.999	0,131138383	9,74E-04
0,603413	0,0394349	0,068	10.001	202,29	109.988	0,112692302	5,57E-04
0,558276	0,0438186	0,057	10.001	466,29	80.004	0,102100037	2,19E-04
0,542856	0,0417592	0,0585	10.001	121,03	79.996	0,107763385	8,90E-04
0,598572	0,0482578	0,0579	10.001	201,99	80.021	0,096730218	4,79E-04
0,445323	0,1316792	0,045	10.001	669,09	50.011	0,101050249	1,51E-04
0,507158	0,129297	0,048	10.001	141,06	49.997	0,094645061	6,71E-04
0,601723	0,129601	0,62	10.001	201,93	50	1,030374441	5,10E-03
0,489767	0,661341	0,095	10.001	598,57	19.996	0,143647528	2,40E-04
0,585729	0,628218	0,097	10.001	127,20	19.998	0,154405	1,21E-03
0,590001	0,617006	0,097	10.001	187,81	20.001	0,157210789	8,37E-04
0,498359	1,0084	0,12	10.001	398,58	9,98	0,119006297	2,99E-04
0,536723	0,938188	0,125	10.001	114,05	9.996	0,133235556	1,17E-03
0,608539	0,932326	0,129	10.001	208,48	9.998	0,13836362	6,64E-04

El número de Deborah para el aceite de jatropha en el ensayo de barrido de amplitud a frecuencia de 10 rad/seg, muestra la misma tendencia. El número es menor de 1 y por lo tanto el comportamiento es viscoso.

## CAPITULO IV

### ANALISIS DE RESULTADOS.

Tras realizar todos los ensayos respectivos a los tres aceites, se puede establecer las características operacionales y funcionales es estos fluidos.

#### **4.1 Análisis de resultados de los ensayos de flujo estacionario.**

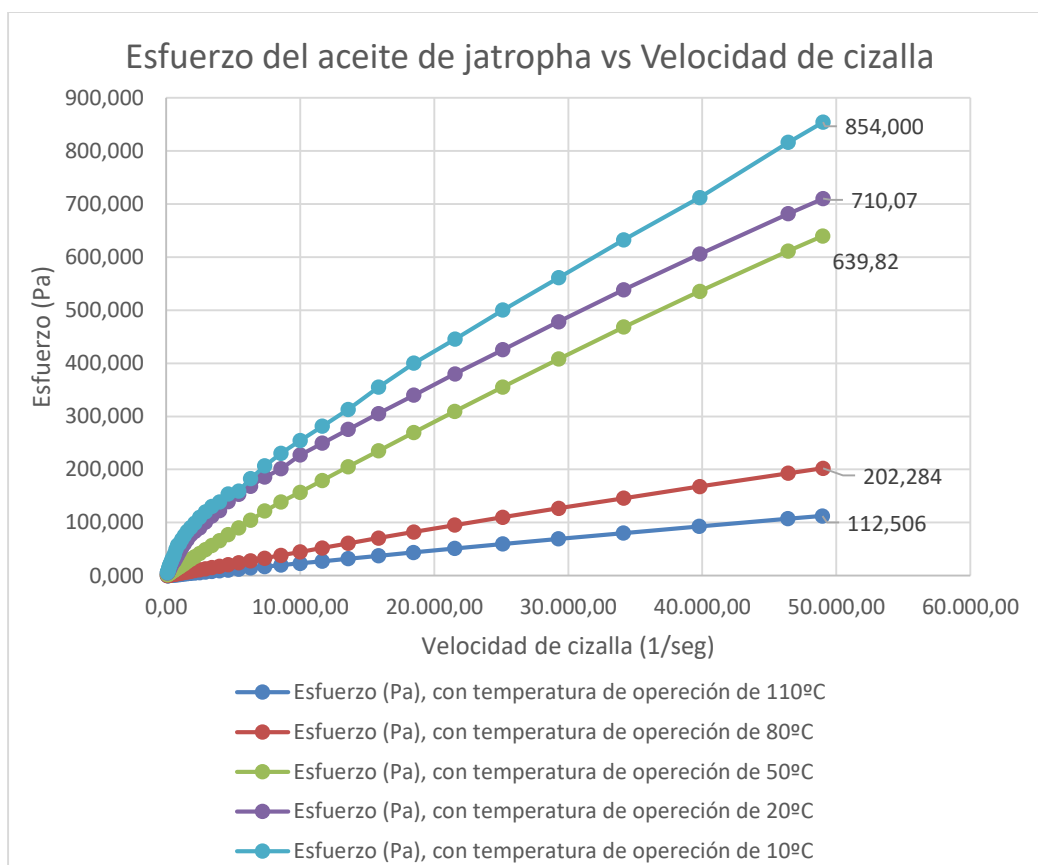
##### **4.1.1 Análisis del flujo estacionario del aceite de jatropha.**

Se sometió el aceite de piñón a un ensayo de “flujo estacionario” que consiste en aumentar progresivamente la velocidad de cizallamiento, manteniendo la temperatura y los parámetros geométricos constantes. Todos los ensayos inician en una velocidad de cizalla de 0.01 1/s hasta 49000 1/s. Con este ensayo se determina la relación esfuerzo vs velocidad de corte. Para determinar la curva de flujo y el tipo de fluido que es.

Como primer aspecto a destacar es que la viscosidad del aceite de piñón empieza a tener un comportamiento coherente y uniforme a partir de una velocidad de cizalla aproximada de 10 - 100 (1/seg), antes de esta velocidad de cizalla la el fluido tiene un comportamiento inestable imposible de clasificarlo en un tipo de fluido específico.

Por ende el aceite de jatropha a bajas velocidades de cizalla no se recomienda utilizar ya que no se conoce su caracterización y tiene un comportamiento inesperado.

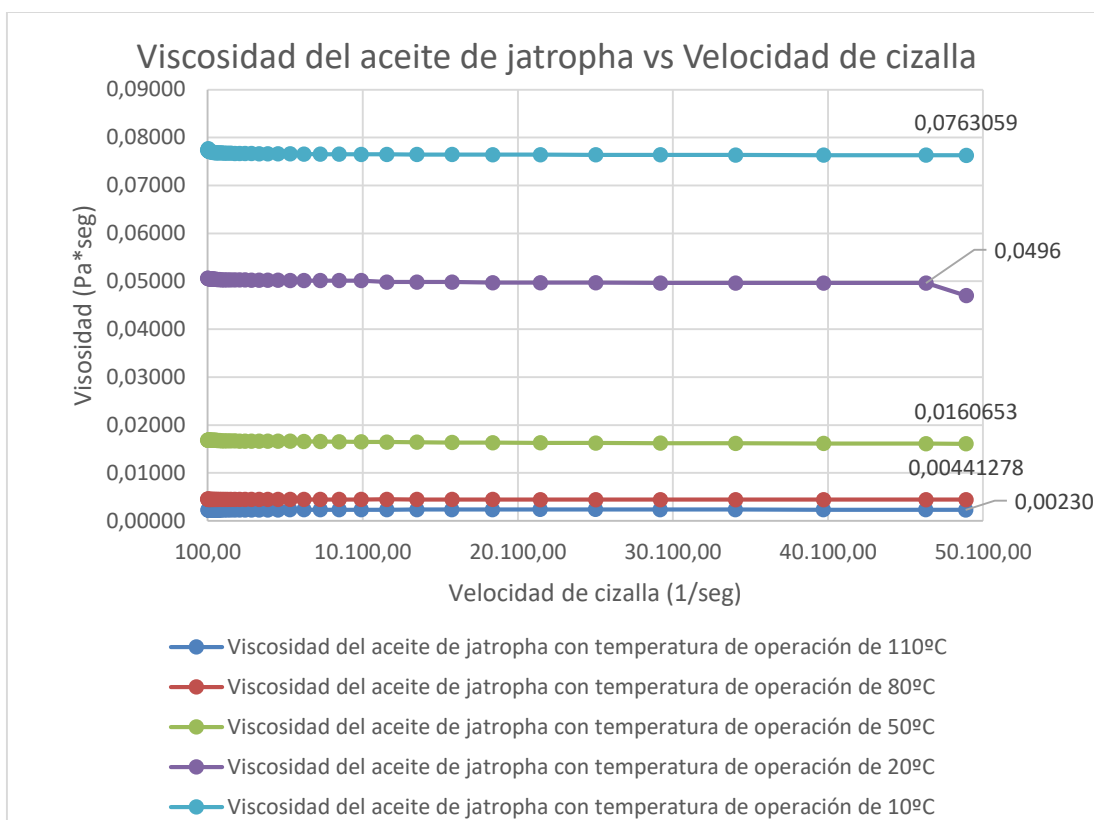
A partir de 10 - 100 (1/seg), la viscosidad se estabiliza y se puede observar que el ensayo de flujo estacionario del aceite de jatropha muestra un comportamiento de fluido newtoniano ya que la curva de flujo presenta una pendiente lineal, comportamiento característico de un fluido newtoniano.



**Figura 49.** Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de jatropha a diferentes temperaturas.

En la gráfica se puede observar que el esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de jatropha es una pendiente, típico comportamiento de un fluido newtoniano. El valor del esfuerzo disminuye a medida que aumenta la temperatura en cada ensayo. Esta reacción es la esperada, ya que a medida que aumenta la temperatura el fluido presenta menos resistencia al esfuerzo.

La viscosidad del aceite de jatropha es lineal en todos los ensayos de flujo estacionario con esto se confirma que el aceite es un aceite newtoniano. A medida que aumenta la temperatura esta viscosidad disminuye como es de esperar.

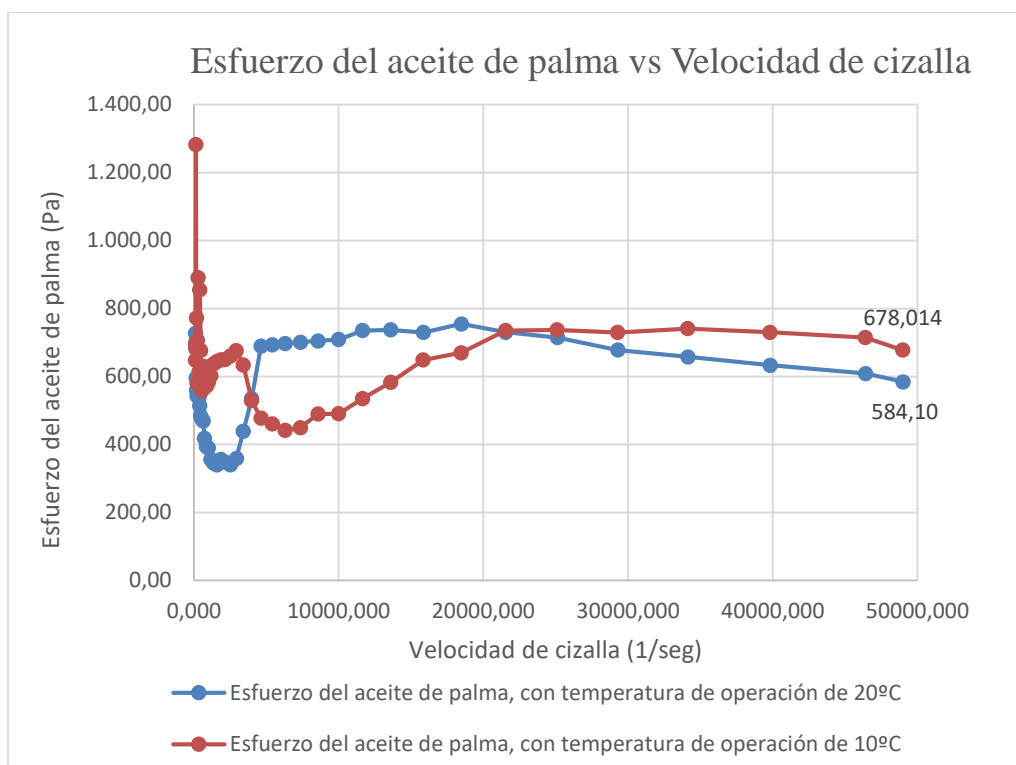


**Figura 50.** Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de jatropha a diferentes temperaturas.

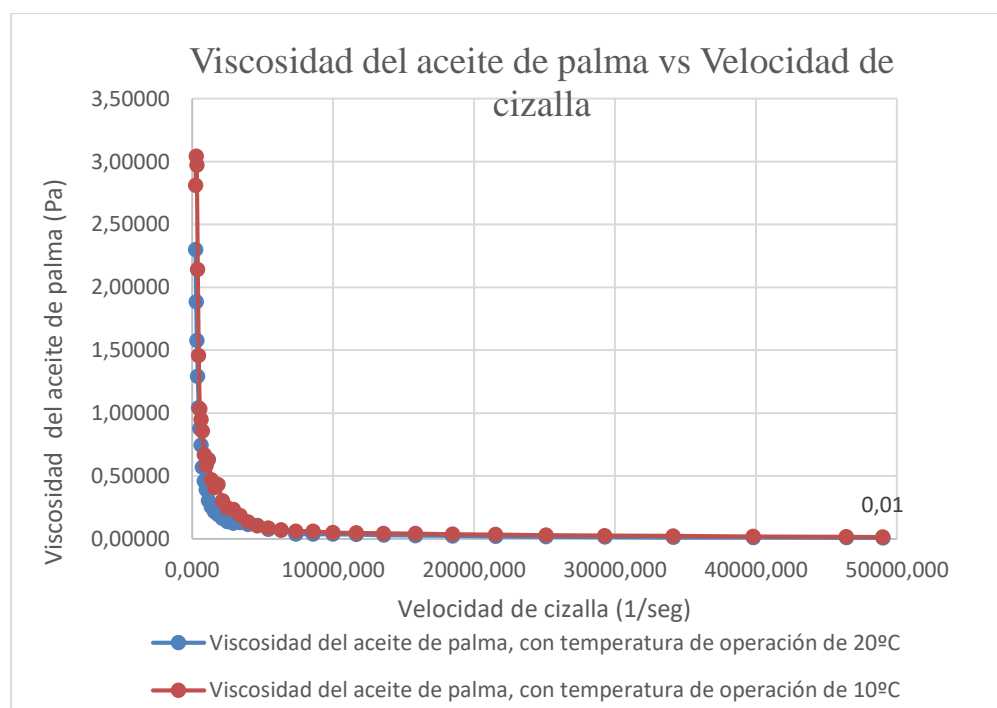
#### 4.1.2 Análisis del flujo estacionario del aceite de palma africana.

El aceite de palma a unas temperaturas inferiores y similares a la temperatura ambiente (27°), posee una estructura física, “pastosa”. En los ensayos de flujo estacionario de 10 °C, y a 20°C, tanto el esfuerzo como la viscosidad presentan comportamiento de fluido no newtoniano, Este comportamiento se atribuye a un fluido pseudoplástico (tixotropía), con posteriores análisis se aclarará el tipo de fluido.





**Figura 51.** Grafica del esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palma a 20°C y 50°C de temperatura.



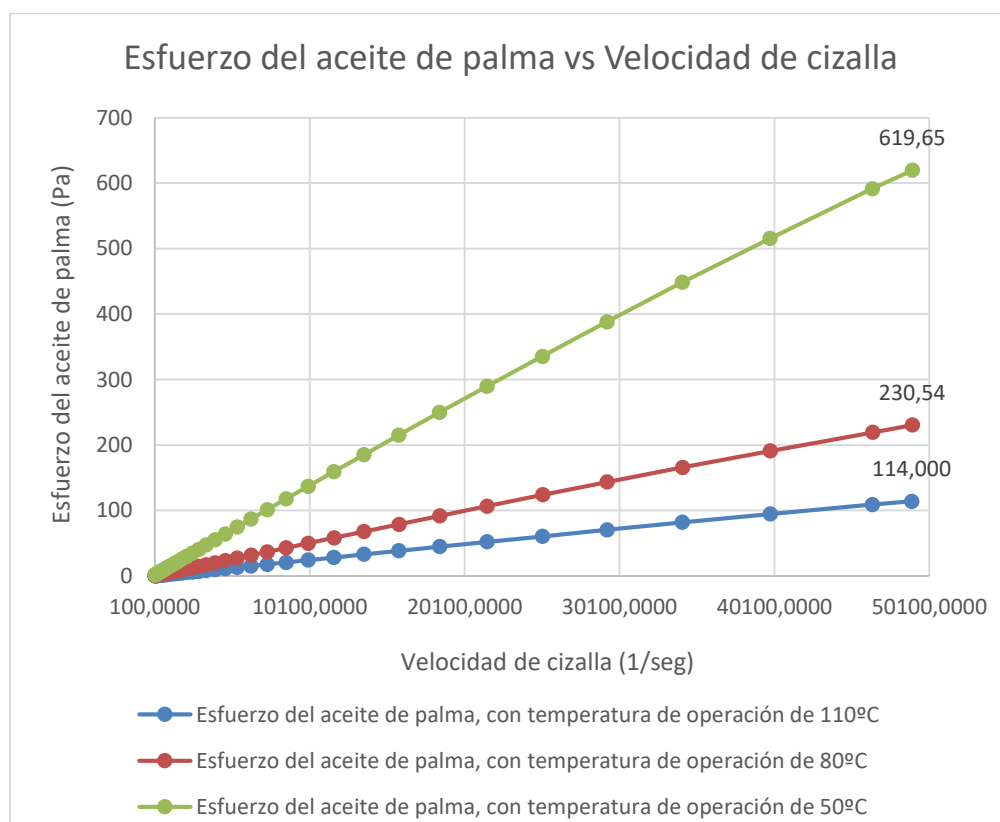
**Figura 52.** Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palma a 20°C y 50°C de temperatura.

Pero en los ensayos posteriores de 50°C, 80°C y 110°C, el comportamiento del aceite de palma es propio de un fluido newtoniano.

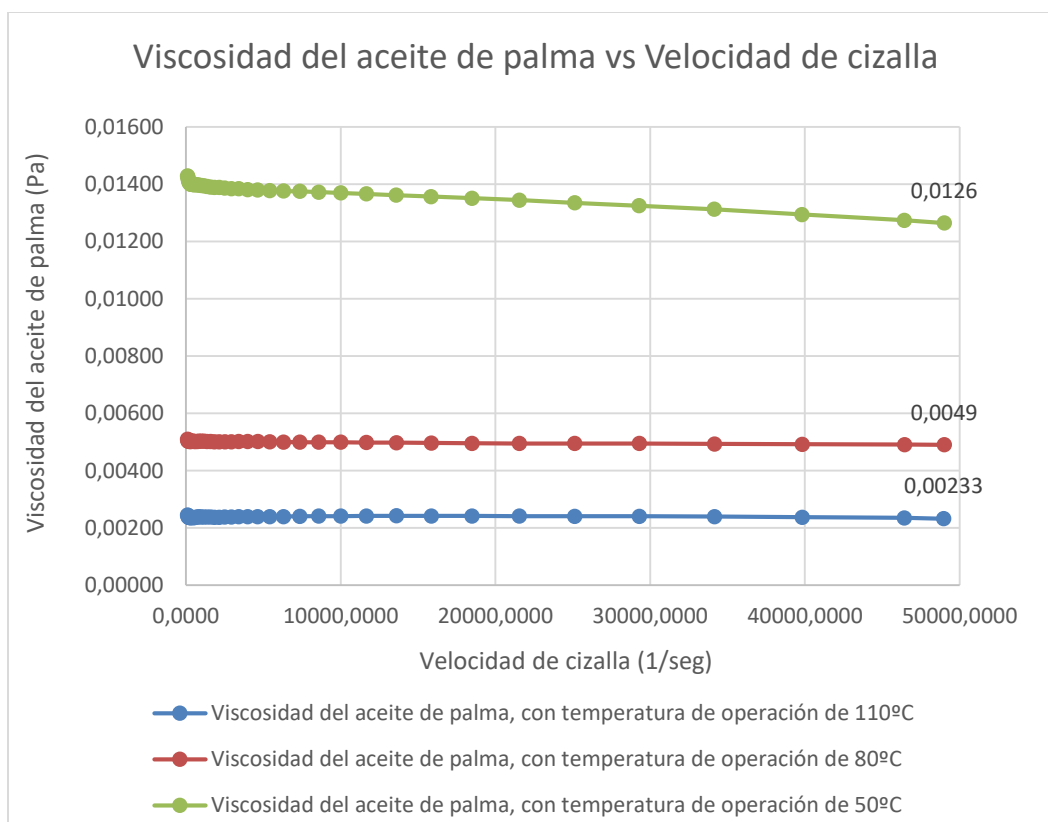
Tras estos análisis se demuestra que el cambio que sufre el aceite es un cambio físico, más no es un cambio micro estructural, el aceite de palma es un aceite newtoniano que cambia su estructura física a temperaturas inferiores a 40°C.

A partir de la temperatura de 40°C el aceite ya se vuelve completamente líquido se comporta de la manera esperada.

El aceite de palma africana también es inestable e irregular a velocidades de cizalla bajas logra su estabilización de la viscosidad y del esfuerzo a partir de 100 (1/seg).



**Figura 53.** Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palma a diferentes temperaturas.



**Figura 54.** Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palma a diferentes temperaturas.

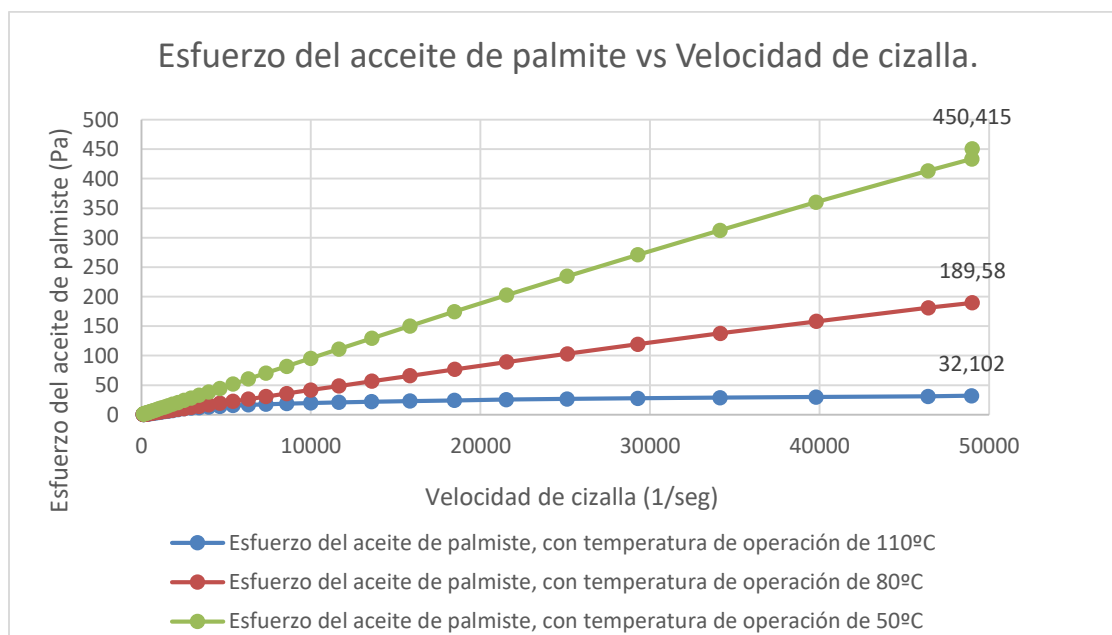
Como propio fluido newtoniano la viscosidad disminuye mientras se aumenta la temperatura.

#### 4.1.3 Análisis del flujo estacionario del aceite de palmiste africana.

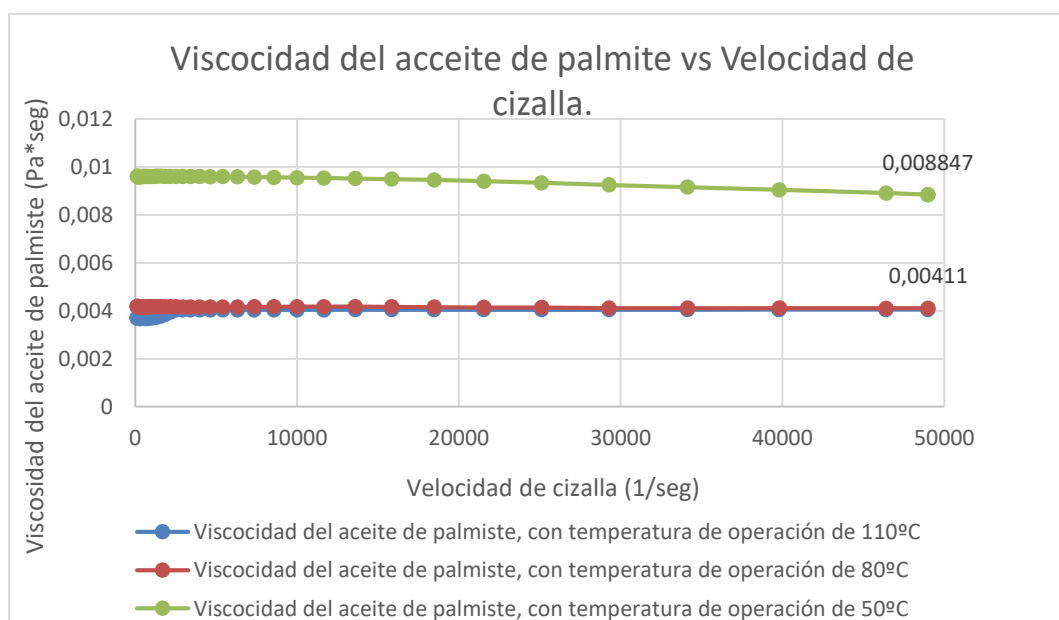
Existe un inconveniente con el aceite de palmiste africano, a diferencia del aceite de palma africana, el aceite de palmiste a temperatura ambiente, este aceite cambia su estado físico, solidificándose por completo. Impidiendo realizar cualquier tipo de ensayo a temperaturas menores a 50°C.

En los ensayos realizados de flujo estacionario se mantienen la misma tónica de los experimentos en los aceites de jatropha y de palma.

A medida que aumenta la temperatura del ensayo de flujo estacionario la viscosidad junto con el esfuerzo, tienden a disminuir. Y en todo momento el aceite de palmiste presenta características de fluido newtoniano.



**Figura 55.** Grafica de esfuerzo vs velocidad de cizalla del aceite de palmite a diferentes temperaturas.



**Figura 56.** Grafica de la viscosidad vs velocidad de cizalla del aceite de palmite a diferentes temperaturas.

Tras el análisis de las curvas de flujo y viscosidad se determina que los aceites son newtonianos. El aceite de jatropha tiene una funcionalidad óptima a partir de una velocidad de cizalla de  $10^1$  (1/seg), mientras que los aceites de palma y palmiste tienen su funcionalidad óptima a partir de  $10^2$  (1/seg), tomando en cuenta las condiciones de temperatura para estos dos últimos.

En la tabla 30 se detallan situaciones de procesos mecánicos, sus aplicaciones industriales y el rango de velocidad de cizalla, donde estos aceites pueden ser empleados.

La velocidad máxima que puede operar el reómetro Discovery Hybrid Rheometer HR-2 es de 49000 (1/seg), pero con los resultados establecidos se concluye que a velocidades de cizalla en el orden de  $10^5$  (1/seg) a  $10^7$  (1/seg), los aceites mantienen un comportamiento newtoniano estable.

**Tabla 30.**

*Rango de gradientes de velocidad para distintas aplicaciones industriales.*

Situación	Rango típico de velocidades de cizalla ( $s^{-1}$ )	Aplicaciones
Sedimentación de polvos finos en suspensión líquida	$10^{-6} - 10^{-4}$	Medicamentos, pinturas
Nivelación debido a la tensión superficial	$10^{-2} - 10^{-1}$	Pinturas, tintas de impresión
Drenaje por gravedad	$10^{-1} - 10^1$	Pinturas y revestimientos. Lejías de baño
Extrusión	$10^0 - 10^2$	Polímeros
Masticar y tragar	$10^1 - 10^2$	Alimentos
Recubrimiento por inmersión	$10^1 - 10^2$	Pintura, confitería
Mezcla y agitación	$10^1 - 10^3$	Fabricación de líquidos
Tubos y conducciones	$10^0 - 10^3$	Bombeo. Flujo sanguíneo
Pulverización y cepillado	$10^3 - 10^4$	Secado por pulverización, pintura, atomización de combustible
Fricción	$10^4 - 10^5$	Aplicación de cremas y lociones en la piel
Pigmentos de molienda en bases fluidas	$10^3 - 10^5$	Pinturas, tintas de impresión
Revestimiento de alta velocidad	$10^5 - 10^6$	Papel
Lubricación	$10^3 - 10^7$	Motores de combustión

Fuente: (Juan García Sánchez, Estudio reológico de dispersiones de líquido iónico con nanotubos de carbono, 2012)

Un inconveniente con la viscosidad de los tres aceites, es que son viscosidades sumamente bajas están en el orden de  $10^{-2}$  (Pa\*seg) y de  $10^{-3}$  (Pa\*seg), lo que limitaría un poco su uso como aceites lubricantes, tendrían que ser empleados como emulsiones de lubricantes, o ser empleados en procesos en los cuales otras características como el poder calórico, capilaridad, cohesión, etc.

Material	Viscosidad típica (Pa·s)
Vidrio	$>10^{20}$
Vidrio fundido (500°C)	$10^{12}$
Asfalto	$10^8$
Polímeros fundidos	$10^3$
Miel	$10^2$
Caramelo	$10^1$
Glicerol	$10^0$
Aceite de oliva	$10^{-1}$
Agua	$10^{-3}$
Aire	$10^{-5}$

**Figura 57.** Viscosidades de algunos materiales.

Fuente: Métodos para la determinación de propiedades reológicas

#### 4.2 Análisis del ensayo de barrido de temperatura.

En las gráficas de los ensayos de barrido de temperatura se puede observar el típico comportamiento newtoniano de un fluido cuando es sometido al aumento progresivo de la temperatura.

El aceite de palma y el aceite de palmiste son los aceites que varían más drásticamente su viscosidad a temperaturas inferiores a 50°C, después de esta temperatura los tres aceites todavía continúan con la disminución progresiva de su viscosidad, pero de forma más gradual.

En un barrido que abarca desde los 20°C hasta los 110°C el aceite de palmiste disminuye su viscosidad en un 95.7%, la jatropha en un barrido de temperatura inicial en 10°C y final de 110°C, la viscosidad de este aceite disminuye un promedio de 90%, mientras que el aceite de palma sufre una disminución de su viscosidad de alrededor del 80% en un barrido de temperatura que inicia en 1°C y finaliza en 110°C.

Todos los aceites en los ensayos de temperatura a bajas velocidades de cizalla, 10(1/seg), tienen un comportamiento irregular esto concuerda con los ensayos de flujo estacionario, donde a bajas velocidades de cizalla el comportamiento de los aceites era impredecible.

El aceite de jatropha es el aceite que posee una mejor respuesta en todos los ensayos de barrido de temperatura;

- Posee más viscosidad que los aceites de palma y palmiste, en cada ensayo.
- Su disminución de la viscosidad es menos pronunciada que los otros dos fluidos.

Todos los aceites presentan un comportamiento esperado en los ensayos de barrido de temperatura, con una disminución gradual de su viscosidad.

#### **4.3 Análisis del barrido de amplitud.**

A temperaturas inferiores de 40°C, el aceite de palma y el aceite de palmiste presentan un cambio físico en su estructura, el objetivo de este ensayo era determinar si este cambio produce una alteración en el comportamiento del fluido.

Con los resultados de los ensayos ya realizados de barrido de amplitud se obtuvo gráficas en las cuales los resultados eran inapropiados. Para comprobar estas gráficas se analizó este procedimiento utilizando el número de Deborah.

Con el respectivo análisis se demostró que este experimento se mostraba incongruente ya que no era aplicable a estos aceites. Los fluidos analizados son newtonianos y el cambio de la estructura física del aceite de palma y de palmiste, no ingiere en la naturaleza de los fluidos.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1 Conclusiones

- El aceite de jatropha, palma africana y palmiste africano son fluidos newtonianos, que debe ser empleado en operaciones que superen una velocidad de cizalla de 100 (1/seg), inferiores a esta velocidad de cizalla los fluidos en cuestión no tienen un comportamiento definido.
- Como se ilustra en la tabla 30, estos aceites pueden ser empleados en procesos como: recubrimientos por inmersión, mezclado y agitación, pulverización y cepillado, revestimiento de alta velocidad, lubricación.
- Los aceites de jatropha, palma y palmiste poseen viscosidades muy bajas, que los limitan enormemente en aplicaciones industriales.
- El aceite de palma africana y el aceite de palmiste africano a temperaturas inferiores de 40°C, cambian su estructura física pero no cambia su comportamiento como fluido newtoniano a otro tipo de fluido. temperatura mínima de operación 50°C, para su adecuada aplicación.

#### 5.2 Recomendaciones.

- El aceite de jatropha, aceite de palma y de palmiste no presenta condiciones apropiadas para ser utilizado como aditivo viscoso. Se tienen que analizar su composición química de estos aceites como por ejemplo; poder calórico, entalpía, entropía nivel oxidante del aceite, etc. para determinar si tiene una característica exclusiva que le permita funcionar como aceite combustible o darle un uso específico. Funciona de manera óptima a velocidades de cizalla elevadas.

- El aceite de palma y de palmiste deben ser empleados en procesos que tengan temperatura inicial superior a 50°C, para que se comporte como fluido viscoso en todo momento y no presente inconvenientes.

## Bibliografía

- (s.f.). Obtenido de [http://www.uni-stuttgart.de/mawi/aktuelles\\_lehrangebot/Lehrstuhl3/WS2016-17/mawi/Rheology\\_Februar\\_2017.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/mawi/aktuelles_lehrangebot/Lehrstuhl3/WS2016-17/mawi/Rheology_Februar_2017.pdf)
- 07, I. E.-7. (s.f.). *Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos*. Obtenido de [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-750-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-750-07.pdf)
- A. F. Méndez-Sánchez, L. P.-T. (22 de Enero de 2010). *Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/41847100\\_Determinacion\\_de\\_la\\_viscosidad\\_de\\_fluidos\\_newtonianos\\_y\\_no\\_newtonianos\\_una\\_revision\\_del\\_viscosimetro\\_de\\_Couette](https://www.researchgate.net/publication/41847100_Determinacion_de_la_viscosidad_de_fluidos_newtonianos_y_no_newtonianos_una_revision_del_viscosimetro_de_Couette)
- Alvarado, J. (1996). *Principios de Ingeniería aplicados a alimentos*. Quito: Radio Comunicaciones.
- Alvarado, J. d. (1996). *Principios de ingeniería aplicados a alimentos*.
- Andronico, J., & Soto, I. (10 de Septiembre de 2002). *Tipo de viscosidad en los magmas: Geocities*. Obtenido de Geocities Web site: [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&act=8&ved=0CD8QFjAFahUKEwjXzerS1erIAhXHHB4KHXwFAxg&url=http%3A%2F%2Fwww.geocities.ws%2Frocmorales%2Fviscosidades.doc&usg=AFQjCNHukO0lkbA9yzwALgzc8SOADDc4\\_g&bvm=bv.106379543,d.dmo](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&act=8&ved=0CD8QFjAFahUKEwjXzerS1erIAhXHHB4KHXwFAxg&url=http%3A%2F%2Fwww.geocities.ws%2Frocmorales%2Fviscosidades.doc&usg=AFQjCNHukO0lkbA9yzwALgzc8SOADDc4_g&bvm=bv.106379543,d.dmo)
- Barnes H. Hutton, W. K. (1989). *Introducción to Rheology*. Amsterdam: Elsevier.
- Benavete, R. (Marzo de 2011). *Comportamiento mecanodinámico, relajaciones en polímeros*. Obtenido de Comportamiento mecanodinámico, relajaciones en polímeros: [http://www2.ictp.csic.es/qf/ppcontrol/bibliografia/D23-Propiedades\\_DMTA\\_Rbenavete.pdf](http://www2.ictp.csic.es/qf/ppcontrol/bibliografia/D23-Propiedades_DMTA_Rbenavete.pdf)
- Biollanos. (Febrero de 2014). *Análisis del aceite de Jatropha*. Obtenido de <https://biollanos.com.ve/investigacion-y-desarrollo/an%C3%A1lisis-del-aceite-de-jatropha.html>
- C, M. (1994). *Rheology: Principles and Measurements*. New York: VCH Publishers.

- Chitue-de-Assunção-Nascimento, M. J. (Agosto de 2013). *Comportamiento reológico de una biograsa de aceite vegetal de Jatropha curcasL y jabón de litio*. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852013000200003](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000200003)
- Darby, R. (1996). *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. New York: Marcel Dekker.
- Estudio de ligantes modificados con caras mediante técnicas reológicas y calorimétricas*. (11 de Abril de 2011). Obtenido de [https://www.ditecpesa.com/pdf/descargas/articulos\\_tecnicos/estudio\\_ligantes\\_modificados.pdf](https://www.ditecpesa.com/pdf/descargas/articulos_tecnicos/estudio_ligantes_modificados.pdf)
- G, O. R. (1999). Introducción a la Reología. *Cuaderno Firp S520 - B*, 45.
- García Sánchez, J. (11 de Septiembre de 2012). *Estudio reológico de dispersiones de líquido iónico con nanotubos de carbono*. Obtenido de Repositorio web site: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2999/1/pfc4387.pdf>
- Icarte, R. M. (2002). Caracterización del comportamiento reológico de sopa de crema orientada a control de calidad. Valdivia , Chile.
- IICA, I. I. (Octubre de 1983). *Guía técnica para el cultivo de palma africana (Elaeis Guineensis, Jacq.)*. Nicaragua: Midinr DGTA. Obtenido de galeon: <http://www.galeon.com/subproductospalma/guiapalma.pdf>
- instruments, T. (Enero de 2016). *Understanding Rheology of Structured Fluids*. Obtenido de [http://www.tainstruments.com/pdf/literature/AAN016\\_V1\\_U\\_StructFluids.pdf](http://www.tainstruments.com/pdf/literature/AAN016_V1_U_StructFluids.pdf)
- Lafargue-Pérez, F., & Díaz-Velázquez. (3 de Septiembre - Diciembre de 2015). *Tecnología Química*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543785004.pdf>
- Luis, P. A. (Julio de 2015). *Estudio Reológico de Dispersiones de Nanotubos de Carbono en Tosalato de 1-etil-3-metilimidazolio*. Obtenido de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4992/tfg604.pdf?sequence=1>
- Mazón Paredes, E. J. (Abril de 2013). Caracterización bromatológica de la torta de palmiste (*Elaeis Guineensis Jacq*) procedente de los cantones de Quevedo y Santo Domingo (Ecuador) para su uso en la alimentación de ovinos. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- Ministerio de Agricultura, G. y. (2013). *Boletín Situacional*. Quito .
- Orlando Rojas, M. I. (2012). Fundamentos de la Reología. *Cuaderno Firp S 521 - C*, 40.

- P. Partais A. Guerrero, M. B. (1997). *Comportamiento reologico no estacionario de emulsiones aceite*. Obtenido de Comportamiento reologico no estacionario de emulsiones aceite:  
<http://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/viewFile/815/824>
- P. Partais A. Guerrero, M. B. (Junio de 1997). *Comportamiento reologico no estacionario de emulsiones aceite en agua estabilizadas con un palmitato de sacarosa*. Obtenido de  
<http://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/viewFile/815/824>
- Peñañiel, D. C. (Octubre de 2011). *Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Ecuador*.
- Peñañiel, D. C. (2011). Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Ecuador. *Oficina regional para América latina y el caribe.*, 96.
- Ponce, S., & Astuhuamánpardavé, G. (5 de Marzo de 2011). *Viscosidad: Scribd*. Obtenido de Scribd Web site: <http://es.scribd.com/doc/96559294/La-Viscosidad#scribd>
- Pro Ecuador, I. d. (2014). *Aceite de palma y elaborados 2014*. Obtenido de Proecuador web site:  
[http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/05/aceite de palma.pdf](http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/05/aceite%20de%20palma.pdf)
- Propiedades físicas de los sistemas dispersos*. (4 de Septiembre de 2009). Obtenido de  
[https://www.google.com/search?ei=ziJFW52uOYic5gLN44\\_QDA&q=El+comportamiento+de+flujo+tambi%C3%A9n+puede+denominarse+comportamiento+reol%C3%B3gico+cuando+los+materiales+se+eval%C3%BAan+acorde+a+los+par%C3%A1metros+de+la+reolog%C3%ADa&oq=El+comportamiento+d](https://www.google.com/search?ei=ziJFW52uOYic5gLN44_QDA&q=El+comportamiento+de+flujo+tambi%C3%A9n+puede+denominarse+comportamiento+reol%C3%B3gico+cuando+los+materiales+se+eval%C3%BAan+acorde+a+los+par%C3%A1metros+de+la+reolog%C3%ADa&oq=El+comportamiento+d)
- Quintáns, L. (11 de Diciembre de 2008). *Reología de productos alimentarios: dspace*. Obtenido de dspace web site:  
[http://dspace.usc.es/bitstream/10347/2556/1/9788498872187\\_content.pdf](http://dspace.usc.es/bitstream/10347/2556/1/9788498872187_content.pdf)
- Ramírez, J. S. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*. Cali - Colombia: ReCiTelA.
- Ramos, A. R. (2008). *Comportamiento reológico de un fluido*. Obtenido de  
[http://www.umar.mx/revistas/36/comportamiento\\_reologico.pdf](http://www.umar.mx/revistas/36/comportamiento_reologico.pdf)
- Renovable, M. d. (14 de Enero de 2016). *Dirección de Biomasa y Cogeneración* .
- Revista\_ElAgro. (2014). Aceite de palma Ecuatoriano en el top ten del mundo. *El Agro*, 5-6.
- Riba, J.-R. (6 de Septiembre de 2010). *Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales*. Obtenido de file:///C:/Users/TOSHIBA/Downloads/269078-365755-1-SM.pdf

- Rincón, S. M. (11 de Agosto de 2009). *Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria*. Obtenido de file:///C:/Users/toshiba/downloads/1432-1432-1-PB.pdf
- Rojas, O., María, B., & Jorge, A. (Marzo de 2012). *Fundamentos de Reología*. Obtenido de <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S521C.pdf>
- Romo, S. (1972). *Química - Física*. Quito: Universitaria.
- Ruiz, A. J. (Octubre de 2009). Determinación de las propiedades reológicas de soluciones acuosas de carboximetilcelulosa, por mediciones experimentales. Cartagena, Colombia.
- Scott Bair, P. (2007). High Pressure Rheology . En P. Scott Bair, *High Pressure Rheology for Quantitative Elastohydrodynamics*. Amsterdam: Elsevier.
- Steffe, J. F. (1992). *Rheological methods in food process engineering*. California: Freeman Press.
- Steffe, J. F., & Daubert, C. R. (2006). *Ductos y Tuberías para Bioprocesos: Reología y Análisis*. USA: Freeman Press.
- Tazraaei, P. R. (2015). The Influence of the Non - Newtonian Properties of Blood on Blood - Hammer Through the Posterior Cerebral Artery. Londres, Inglaterra.
- TechnoServe. (abril de 2009). *Manual técnico de palma africana*. Obtenido de coapalmaecara web site: <http://www.coapalmaecara.com/files/05%20Control%20Fitosanitario.pdf>
- Técnicas Reométricas . (2005). En *La Reometría* (págs. 80-120).
- Técnicas Reométricas: rua*. (s.f.). Obtenido de Rua web site: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>
- Treviño, M. P. (2010). *Implementación de una metodología para la determinación de propiedades reológicas*. Obtenido de <http://159.90.80.55/tesis/000158027.pdf>
- Troy, D. B. (2005). *Remington: The Science and Practice of Pharmacy*. Filadelfia: Williams & Williams.
- Velasquez, H. J. (2006). *Reología de fluidos y su aplicación en el área de los alimentos*. Medellín, Colombia.
- Zumbado, M., Madrigal, S., & Marín, M. (1992). *Composición y valor nutricional del palmiste o coquito integral de palma africana (Elaeis Guinensis) en pollos de engorde*. Obtenido de Mag web site: [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v16n01\\_083.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v16n01_083.pdf)