

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS  
Departamento Académico de Ciencias, Tecnología e Ingeniería de Alimentos



CINÉTICA DE DETERIORO EN LA VISCOSIDAD DEL ACEITE DE  
ALMENDRA DE PALMA (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

HUAMANYAURI BALVIN, EDWIN RUBÉN

PROMOCIÓN 2014

Tingo María - Perú

2016



## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Por darme la vida y guiarme en todo el camino de mi formación profesional.

### **A mis queridos padres:**

Lauro Neptali Huamanyauri Hilario y Gladis Felipa Cajahuaringa Balvin, por darme la vida y su amor en todo momento.

### **A mis hermanos:**

Tonny Aldo, Luis Miguel y Anthony Lauro, quienes me inculcaron sus sabios consejos, que significaron mucho en mi formación académica.

### **A mis tíos:**

Raquel y Leynes, quienes me dieron una razón para seguir adelante.

A mis primos: Gaby, Bruce, Albeniz, Marcos, Rosell, Egner, quienes fortalecieron mi familia brindándome todo su apoyo.

## **AGRADECIMIENTO**

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme la oportunidad de realizarme como profesional.
- A la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, a todos mis profesores por su apoyo incondicional durante toda mi formación superior y a los trabajadores en general.
- Al asesor del presente trabajo de investigación, Ing M.Sc. Williams Roldan Carbajal por su apoyo incondicional en cada etapa de la investigación y por su paciencia.
- A los miembros de jurado: Ing M.Sc. Jaime Basilio Atencio, Ing. Humberto Rivera Ríos y al Ing. M.Sc. Luz Milagros Follegati Romero, por su amistad, confianza, apoyo incondicional y los consejos durante la elaboración y culminación de la investigación.
- A mis amigos: Kevin Luben Soto Alvarado, Luis Ernesto Crespín Padilla, Hugo Huaringa Valderrama, Anabel Trujillo Barrientos, Cynthia Kareli Culquipoma Hurtado, por su apoyo moral e incondicional durante las diferentes etapas de presente trabajo.
- A todos mis amigos y amigas quienes me brindaron su apoyo, amistad y compañerismo en la presente investigación y vida universitaria.



## ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
	2.1. Palma de aceite .....	3
	2.1.1. Descripción botánica.....	6
	2.2. Aceite de almendra de palma .....	7
	2.2.1. Composición y propiedades.....	7
	2.3. Cinética de reacciones básicas para predecir la pérdida de la calidad de los alimentos .....	8
	2.3.1. Ecuaciones integradas de velocidad según el orden de reacción cinética .....	10
	2.3.2. Velocidad y temperatura.....	12
	2.4. Factores de deterioro en aceites y grasas .....	13
	2.4.1. Determinación de parámetros cinéticos de aceite de almendra de palma.....	14
	2.5. Viscosidad.....	15
	2.5.1. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico ....	16
	2.5.3. Variación de la viscosidad con la temperatura .....	18
III.	MATERIALES Y METODOS .....	19
	3.1. Lugar de la ejecución .....	19
	3.2. Materiales.....	19
	3.2.1. Materiales de laboratorio.....	19
	3.2.2. Equipos .....	19
	3.2.3. Reactivos .....	20
	3.3. Métodos de análisis.....	20

3.4. Análisis estadístico .....	20
3.5. Metodología experimental .....	21
3.5.1. Acondicionamiento del material de análisis .....	21
3.5.2. Evaluación durante el almacenamiento del aceite.....	21
3.5.3. Determinación de los parámetros de cinética .....	21
3.4.4. Simulación del deterioro del índice de acidez, e índice de peróxido. .....	23
3.4.4. Obtención de los parámetros de viscosidad a través del método MISCKA (1982) indicado por MARTINEZ (2002).....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	24
4.1. Características fisicoquímicas del aceite de almendra de palma ( <i>Elaeis     guineensis</i> ).....	24
4.2. Evaluación del índice de acidez durante almacenamiento. ....	25
4.3. Parámetros de cinética para el índice de acidez. ....	27
4.3.1. Determinación del orden de reacción (n) y constante de velocidad de reacción (k) para el índice de acidez. ....	27
4.4. Simulación de la cinética de degradación para el índice de acidez del aceite de almendra de palma.....	30
4.5. Evaluación del índice de peróxido durante almacenamiento. ....	31
4.6. Parámetros de cinética para el índice de peroxido .....	34
4.6.1. Determinación del orden de reacción (n) y constante de velocidad de reacción (k) para el índice de peroxido .....	34
4.7. Simulación de la cinética de degradación del aceite de almendra de palma, en función al índice de peróxidos. ....	37
4.8. Evaluación de la viscosidad absoluta durante almacenamiento. ....	38

4.9. Correlación de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido a diferentes temperaturas .....	42
V. CONCLUSIONES.....	43
VI. RECOMENDACIONES .....	45
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	46
ANEXO .....	52

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N°	Página
1. Producción mundial de aceites vegetales (1000 TM).....	4
2. Composición de ácidos grasos de los aceites de palmiste, coco y palma media (%)......	8
3. Principales modelos matemáticos para fluidos esfuerzo cortante ( $\tau$ ), velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), índice de consistencia (k) e índice de comportamiento de flujo. ....	17
4. Características fisicoquímicas de la muestra de aceite de almendra de palma.....	24
5. Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.....	26
6. Efecto de la temperatura, en el índice de acidez en almacenamiento del aceite de almendra de palma.....	27
7. Constante de velocidad de reacción (k) del índice de acidez del aceite de almendra de palma.....	28
8. Constante de velocidad de reacción (k) del índice de acidez, acondicionadas para el ajuste al modelo de Arrhenius.....	29
9. Parámetros de Arrhenius del índice de acidez del aceite de almendra de palma a diferentes temperaturas.....	30
10. Variación del índice de peróxido en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.....	32
11. Efecto de la temperatura, en el índice de peróxido en almacenamiento	

del aceite de almendra de palma.....	34
12. Constante de velocidad de reacción (k) del índice de peróxido del aceite de almendra de palma.....	35
13. Constante de velocidad de reacción (k) del índice de peróxido, acondicionadas para el ajuste al modelo de Arrhenius.....	36
14. Parámetros de Arrhenius del índice de peróxido del aceite de almendra de palma a diferentes temperaturas.....	37
15. Variación del coeficiente de consistencia (k) en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.....	39
16. Análisis de varianza del efecto temperatura y tiempo de almacenamiento en el coeficiente de consistencia en el aceite de almendra de palma.....	40
17. Análisis de varianza del efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el índice de acidez, en el aceite de almendra de palma.....	56
18. Análisis de varianza del efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el índice de peróxido, en el aceite de almendra de palma.....	57
19. Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 30° C.....	58
20. Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 40° C.....	59
21. Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 50° C .....	60

22. Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 60° C .....	61
23. Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 50°C.....	62
24. Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 50°C.....	63
25. Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 50°C.....	63
26. Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 30°C.....	64
27. Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 30°C.....	65
28. Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 30°C.....	65
29. Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 40°C.....	66
30. Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 40°C.....	66
31. Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 40°C.....	66
32. Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 60°C.....	67
33. Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 60°C.....	67
34. Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 60°C.....	68



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°	Página
1. Producción mundial de aceites vegetales 2006/2007.....	5
2. Producción mundial de aceites vegetales 2011/2012.....	5
3. Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas.....	26
4. Variación del índice de peróxido en almacenamiento a diferentes temperaturas. ....	33
5. Constante de velocidad de reacción (K) del índice de peróxido de orden cero con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.....	36
6. Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción cero).....	69
7. Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción uno).....	70
8. Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción dos).....	71
9. Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden cero con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.....	72
10. Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden uno con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.....	73
11. Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden dos con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.....	74
12. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día cero de la evaluación.....	75
13. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día cuatro de la evaluación.....	76



14. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día ocho de la evaluación.....	77
15. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día doce de la evaluación.....	78
16. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día dieciséis de la evaluación.....	79
17. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veinte de la evaluación.....	80
18. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veinticuatro de la evaluación.....	81
19. Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veintiocho de la evaluación.....	82

## RESUMEN

La calidad fisicoquímica del aceite de almendra de palma es muy importante en el procesamiento de sus derivados. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la cinética de deterioro del aceite de almendra de palma (*Elaeis guinensis* Jacq.) determinando a través de los índices de acidez y de peróxido y de su viscosidad. La muestra fue proporcionada por la empresa Oleaginosas del Perú (OLPESA), localizada en el distrito de Tocache, provincia de Tocache, región San Martín. La muestra fue almacenada en el laboratorio de Ingeniería de Alimentos a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C durante 28 días y cada cuatro días se evaluó el índice de acidez, índice de peróxido y viscosidad. En los resultados de índice de acidez e índice de peróxido no se encontró variación significativa durante el almacenamiento. Los parámetros de cinética para el índice de acidez fueron: orden de reacción cero, con  $R^2 = 0,9617$ ,  $E_a = 5,0792$  Kcal/mol y 81 días para alcanzar al límite máximo de acidez (4 mg de KOH/g de aceite a 30 °C). Los parámetros de cinética del índice de peróxido fueron: orden de reacción cero,  $R^2 = 0,9817$ ,  $E_a = 5,8463$  Kcal/mol y 613 días para alcanzar al límite máximo de índice de peróxido (10 meq O<sub>2</sub>/g de aceite a 30 °C. No existe efecto significativo de la viscosidad con la temperatura de almacenamiento (Pvalor = 0,616), tampoco con el tiempo de almacenamiento (Pvalor = 0,218).

No existe correlación de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido por tener un coeficiente de correlación de 0,7275.

## I. INTRODUCCIÓN

La principal forma de deterioro de los aceites es la oxidación, que lleva consigo la pérdida de vitaminas, ácidos grasos esenciales, pardeamiento no enzimático del producto y la formación de peróxidos reconocidos por el sabor a rancio que le confiere al aceite de almendra de palma.

El aceite de almendra de palma es obtenida después de extraer el aceite de palma, es utilizado mayormente para la fabricación de cosméticos; uno de los problemas más comunes es su calidad fisicoquímica, el cual acarrea costos muy elevados para poder utilizarlo en las industrias, por ello la estabilidad oxidativa es una prueba predictiva que evalúa la resistencia de las grasas y los aceites a reacciones de oxidación y da indicación de su vida de anaquel, dependiendo de las condiciones de manejo, almacenamiento y procesamiento (CASTILLO, 2007).

Existe escasa referencia sobre el comportamiento de la cinética de deterioro del aceite de almendra de palma, siendo de gran importancia y de necesidad en las industrias extractoras para poder predecir su deterioro; al igual que otros aceites los métodos más utilizados en laboratorio son el índice de acidez, índice de peróxido, humedad, contenido de carotenos, frecuentemente utilizados para el análisis químico, sin embargo la variable viscosidad podría

predecir y explicar la formación de compuestos indeseables, el cual se pretende relacionar directamente con el índice de acidez y el índice de peróxido.

Esta investigación constituye un aporte técnico y científico para las futuras investigaciones en el campo agroindustrial de los aceites ya que servirá para plantear propuestas de análisis a menor costo. Por las consideraciones expuestas, se plantearon los siguientes objetivos:

- Determinar la cinética de deterioro del índice de acidez e índice de peróxido en el aceite de almendra de palma.
- Determinar el índice de flujo y coeficiente de consistencia en función del tiempo y temperatura.
- Determinar mediante la regresión lineal múltiple la relación del comportamiento de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido del aceite de almendra de palma, dependiendo del tiempo y temperatura.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Palma de aceite

La palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) es originaria de la costa de Guinea en el oeste de África, desde donde fue introducido a otras partes de África, sudeste de Asia y Latinoamérica. Existen indicios de que ésta ha sido utilizada con fines comestibles desde hace aproximadamente 5000 años (VELASQUES y GOMEZ, 2010).

La palma africana o palma de aceite es una planta monoica, que posee un tallo robusto no ramificado que puede alcanzar de 20 a 30 m de altura, marcado anularmente por las cicatrizaciones de las bases de las hojas desprendidas y, en condiciones naturales, puede llegar a tener una 15 longevidad de hasta 200 años. Las flores son unisexuales y están situadas sobre inflorescencias separadas, los frutos aparecen en número de 200-300, y son drupas que miden 4 cm de longitud, de color rojo o negruzco, carnoso, que rodea a un cuerpo negro muy duro que a su vez contiene la semilla blanca y mantecosa (VELASQUES y GOMEZ, 2010).

Según PALM OIL ALLIANCE (2015), el aceite de palma es el aceite vegetal más utilizado en el mundo. El aceite del fruto de la palma, generalmente conocido como aceite de palma, se produce a partir de la pulpa del fruto del árbol de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), esta fruta tropical es de color rojizo

debido a un alto contenido de betacaroteno, el fruto es del tamaño de una aceituna grande. Tiene una sola semilla o nuez (palmiste), que se utiliza para producir aceite de nuez de palma, también llamado aceite de palmiste. Cada fruto de palma contiene alrededor de un 30 a 35 por ciento de aceite. El aceite de la pulpa del fruto de la palma y el aceite de palmiste difieren significativamente en su composición de ácidos grasos, pero tienen el mismo origen botánico.

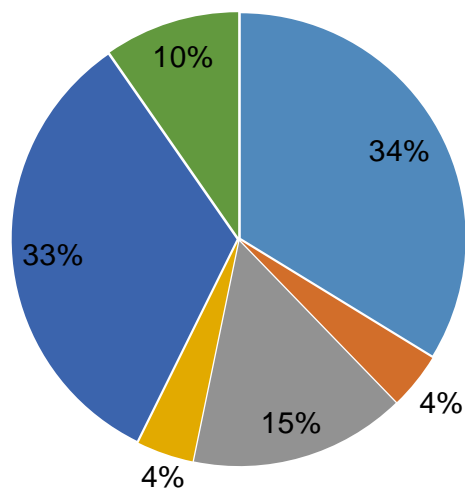
En el Cuadro 1 se presenta la producción mundial de los principales aceites vegetales en miles de toneladas métricas (TM) desde el año 2006 hasta el 2012, así como en las Figuras 1 y 2, las mismas que reflejan el incremento de estos aceites en el año 2006 y el 2011.

**Cuadro 1.** Producción mundial de los principales aceites vegetales (1000 TM)

Años	Palma	Palmiste	Total palma	Canola	Maní	Soya	Girasol	Total
2006/2007	37,33	4,44	41,77	17,13	4,49	36,53	10,7	110,64
2007/2008	41,08	4,88	45,96	18,44	4,86	37,8	10,11	117,19
2008/2009	43,99	5,17	49,16	20,51	5,02	35,91	11,99	122,59
2009/2010	45,86	5,5	51,36	22,32	4,67	38,87	12,1	129,32
2010/2011	47,93	5,66	53,59	23,32	5,14	41,23	12,2	135,48
2011/2012	50,57	5,7	56,27	22,82	5,16	42,73	13,82	140,8

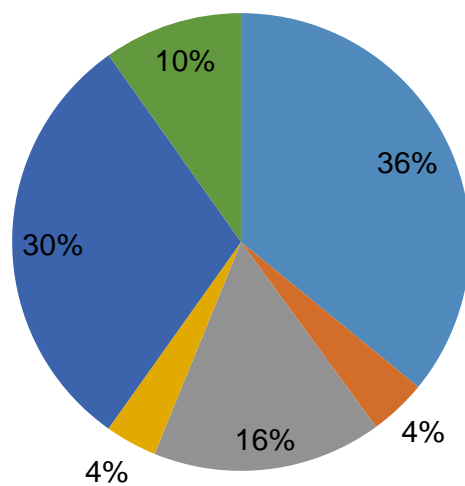
**Fuente:** PALMAS (2012).

■ Palma ■ Palmiste ■ Canola ■ Mani ■ Soya ■ Girasol



**Figura 1.** Producción mundial de aceites vegetales 2006/2007.

■ Palma ■ Palmiste ■ Canola ■ Mani ■ Soya ■ Girasol



**Figura 2.** Producción mundial de aceites vegetales 2011/2012.

### 2.1.1. Descripción botánica

La palma aceitera está rodeada de flores masculinas y femeninas de colores llamativos, de las cuales nacen abundantes frutos ovoides, alargados o esféricos que forman racimos que pesan de diez a cuarenta kilogramos. Los frutos previamente a su color rojizo, son de color violeta, en su interior se encuentra una semilla o almendra llamada palmiste, posee un endocarpio leñoso rodeado de una pulpa carnosa. Tanto la pulpa carnosa como la semilla son las que proporciona dos clases de aceite. En cuanto al tallo, también se le conoce como estipe de la reina de la reina de las oleaginosas, el cual es derecho con una forma de cono invertido cuando es joven, es áspero y cuando llega a la vejez muestra cicatrices cerca de las cuarenta hojas. Las hojas de una palma de edad mediana toman una posición paralela al suelo, llegando así a los tres y siete metros, cada hoja posee alrededor de doscientos folíolos no alineados (JARAMILLO, 2013)

JUEZ *et al.* (2004) menciona que la clasificación de la palma aceitera se debe al científico Hutchinson y es la siguiente:

División: Fanerógamas

Tipo: Angiosperma

Clave: Monocotiledóneas

Orden: Palmales

Familia: Palmaceae

Tribu: Coccoinea

Género: *Elaeis*

Especie: *Elaeis guineensis*.



## **2.2. Aceite de almendra de palma**

Del fruto se obtiene la pulpa para la extracción del aceite de palma y aceite de palmiste (de la almendra), empleado para extraer aceite (VEGA, 2004). El palmiste o almendra representa aproximadamente entre el 5 a 12 % del peso del racimo, por consiguiente, constituye un subproducto importante del proceso de extracción del fruto de la palma (TANG, 1992).

### **2.2.1. Composición y propiedades**

El aceite de almendra de palma está compuesto entre 46 y 51 % por el ácido graso láurico (C12:0) y entre 14 y 16 % por el ácido graso mirístico (C14:0). Sus características físicas y composición química lo asemejan al de coco, razón por la cual ambos se conocen comúnmente como aceites laúricos, cuyo grupo oleoquímico más representativo son los agentes de actividad superficial (surfactantes) (CENIPALMA, 2008).

Los aceites de palma y de palmiste para la fabricación de metil ésteres, ácidos grasos, alcoholes grasos, amidas y amidas grasas, y agentes de superficie orgánicos no iónicos (surfactantes), que se emplean en industrias como las de combustibles, detergentes, cosméticos, plásticos, cauchos, espumas, pinturas, farmacéuticos, lubricantes, alimentos, papel y tintas, entre muchas otras (CENIPALMA, 2008).

En el Cuadro 2, se observa la composición de los ácidos grasos en porcentaje en aceite de almendra de palma, aceite de coco y aceite de palma, donde se observa que el aceite de almendra de palma tiene todos los ácidos grasos mencionados.

**Cuadro 2.** Composición de ácidos grasos de los aceites de palmiste, coco y palma media (%).

<b>Acido grasos</b>	<b>Aceite de almendra de palma</b>	<b>Aceite de coco</b>	<b>Aceite de palma</b>
C6	0,3	0,4	-
C8	4,2	7,3	-
C10	3,7	6,6	-
C12	48,7	47,8	0,2
C14	15,6	18,1	1,1
C16	7,5	8,9	44,1
C18	1,8	2,7	4,4
C18:1	14,8	6,4	39
C18:2	2,6	1,6	10,6
OTROS	0,1	0,1	0,75

Fuente: CODEX ALIMENTARIUS (2009).

### **2.3. Cinética de reacciones básicas para predecir la pérdida de la calidad de los alimentos**

ATKINS (2006) menciona que las leyes de velocidad son ecuaciones diferenciales y se deben integrar si se desean obtener las concentraciones en función del tiempo. Incluso las leyes de velocidad más complejas se pueden integrar numéricamente. Sin embargo, en muchos casos simples se obtienen fácilmente soluciones analíticas, conocidas como leyes de velocidad integral,

que demuestran ser muy útiles; a continuación, la ecuación general de velocidad de reacción.

$$\pm \frac{dA}{d\theta} = kA^n$$

Dónde:

A = factor de calidad a medir

$\theta$  = tiempo

K = constante que depende en especial de la temperatura

n = factor de potencia llamado “orden de reacción”, el cual define si la velocidad es dependiente de la cantidad presente A.

$\pm \frac{dA}{d\theta}$  = Velocidad de cambio de A con respecto al tiempo.

El signo positivo es utilizado si el deterioro es una pérdida o destrucción de A (por ejemplo, un nutriente o un aroma característico) y un signo negativo señala si por la destrucción de un producto final indeseable (por ejemplo, pérdida de aroma o de coloración). Usualmente los resultados de estos estudios para predecir la pérdida de calidad no son obtenidos como una velocidad sino como la cantidad de A como una función del tiempo. Así para obtener la velocidad de deterioro, uno debe transformar los datos mediante los datos mediante un gráfico cinético.

La ley de velocidad de una reacción indica como varia la velocidad con la concentración de los reactivos en un instante dado y se ha determinado un procedimiento para determinar la velocidad a partir de la pendiente de la gráfica resultante de presentar la velocidad en función de la concentración, obtener el orden (CASELLES, 2015).

### 2.3.1. Ecuaciones integradas de velocidad según el orden de reacción cinética

En cinética química un experimento implica determinar la variación de la concentración de reactivos y/o productos con el tiempo y dado que las ecuaciones de velocidad son ecuaciones diferenciales, es necesario integrarlas para hallar las concentraciones en función del tiempo. Los casos más sencillos según DÍAZ (2010) son:

#### 2.3.1.1. Reacción de orden cero

En una reacción de orden cero la ecuación diferencial de velocidad es:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k$$

Integrando

$$\int_{[A]_0}^{[A]} d[A] = - \int_0^t k dt$$

Tenemos

$$[A] = [A]_0 - kt$$

La representación de  $[A]$  frente a  $t$  da una recta de pendiente  $k$  y ordenada en el origen  $[A]_0$ .

Estas reacciones se dan en el caso de las reacciones heterogéneas en las que la velocidad de reacción es independiente de la concentración de reactivos (DIAZ, 2010).

### 2.3.1.2. Reacción de primer orden

CASELLES (2015) menciona que para una ecuación de primer orden del tipo

$A \longrightarrow B$ , la ecuación de velocidad es.

$$\text{velocidad} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]$$

O sea:

$$-\frac{d[A]}{[A]} = kdt$$

Integrando entre los tiempos  $t=0$  y  $t$  se obtiene:

$$-\int_0^t \frac{d[A]}{[A]} = k \int_0^t dt$$

Por lo que

$$\ln[A]_t - \ln[A]_0 = -kt$$

### 2.3.1.3. Reacción de segundo Orden

CASELLES (2015) menciona que, para una reacción de segundo orden, que es aquella cuya velocidad depende de la concentración del reactivo elevada a la segunda potencia, se tiene:

$$\text{velocidad} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2$$

Reordenando

$$-\frac{d[A]}{[A]^2} = kdt$$

Integrando:

$$-\int_0^t \frac{d[A]}{[A]^2} = k \int_0^t dt$$

Por lo que

$$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = kt$$

Luego la concentración de "A" varía con el tiempo según la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{[A]_t} = kt + \frac{1}{[A]_0}$$

### 2.3.2. Velocidad y temperatura

BATTANER (2013) menciona que en 1889, Arrhenius propuso que la dependencia de la constante de velocidad  $k$  en función de la temperatura viene dada por la expresión:

$$K = A * e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

En la que  $R$  es la constante de los gases,  $T$  la temperatura absoluta,  $A$  el llamado factor de frecuencia y  $E_a$  la energía de activación. Tomando logaritmos en la expresión llegamos a:

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A$$

En la que vemos que una representación del logaritmo de la constante de velocidad en función del recíproco de la temperatura absoluta  $1/T$  da una recta cuya pendiente es  $-E_a/R$  y su corte en coordenadas  $\ln A$ . Por tanto, se puede calcular la energía de activación midiendo el valor de constante de velocidad en función del recíproco de temperatura y representando los datos conforme a la ecuación lo que se conoce como representación de Arrhenius.

Se puede dar una interpretación de esta relación de la siguiente forma: la temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de un reactivo. Para una temperatura concreta T, las energías de las moléculas se distribuyen conforme a una ley de probabilidad no muy diferente de las que se rigen para fenómenos aleatorios; habrá un cierto número de moléculas con energía igual a la media, otras con energías superiores y otras con energías inferiores. El factor  $\exp(-E_a/RT)$  (factor de Boltzmann) es precisamente la fracción de moléculas con una energía igual o mayor a la requerida para reaccionar. El factor de frecuencia, por su parte, tiene las mismas dimensiones que la constante de velocidad K y es proporcional a la frecuencia de colisiones entre moléculas, de ahí su nombre (BATTANER, 2013).

#### **2.4. Factores de deterioro en aceites y grasas**

SALAZAR *et al.* (2007) Indica que los factores que afectan el deterioro de las grasa y aceites esta la temperatura, observándose que un incremento de la misma aumenta la velocidad de reacciones de deterioro, evaluándose en función de variables o índices que permitan determinar si ha ocurrido reacciones con los grupos funcionales de las grasas o aceites que pueden provocar degradación de los mismos o de sus componentes. Entre ellos destacan el índice de acidez (IA), que es una medida de ácidos grasos libres presentes en grasa y aceites, y el índice de peróxidos (IPO), que es una medida del oxígeno unido a las instauraciones presentes en los ácidos grasos libres en forma de peróxidos.

### **2.4.1. Determinación de parámetros cinéticos de aceite de almendra de palma.**

TORRES (2003) señala que, para descubrir la influencia de la temperatura en la velocidad de reacción, como por el uso de la expresión de Arrhenius es necesario saber los valores de los parámetros cinéticos:

El método de regresión lineal involucra plotear el logaritmo de la constante de velocidad contra el recíproco de la temperatura (absoluta). Es necesario obtener las constantes de velocidad por lo menos de tres temperaturas diferentes. Puesto que este ploteo debe ser una línea recta, el procedimiento de la regresión es para determinar la pendiente y el intercepto, y se llega a obtener valores para el factor pre-exponencial y la energía de activación.

#### **2.4.1.1. Método de incubación en estufa de aceite**

La muestra se incuba a 65 °C y se determina periódicamente su índice de peróxido o sus propiedades sensoriales; el tiempo necesario para llegar a un límite de rancidez establecido, es el resultado del análisis (FENEMA, 2006).

#### **2.4.1.2. Determinación Índice de acidez en aceites y grasas**

El índice de acidez de un aceite o de una grasa, se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio requeridos para neutralizar la acidez libre por gramo de muestra. A menudo, el resultado se expresa como el porcentaje de ácido oleico presente en la muestra.

El índice de acidez es una medida del grado de descomposición del aceite o de la grasa, por acción de las lipasas o por alguna otra causa. La



descomposición se acelera por la luz y el calor. Como la rancidez se acompaña, usualmente, por la formación de ácidos grasos libres, la determinación es usada, con frecuencia, como una indicación general de la condición y comestibilidad de los aceites y grasas (HERRERA *et al.*, 2003).

#### **2.4.1.3. Índice de peróxido de aceites y grasas**

Los productos iniciales en la oxidación (rancidez) de aceites y grasas son los hidroperóxidos (R-COOH); sin embargo, se denominan normalmente peróxidos. La determinación de peróxidos se basa en su capacidad de liberar yodo de una disolución de yoduro de potasio en ácido acético glacial, el yodo formado se valora con una disolución patrón de tiosulfato de sodio, utilizando una disolución de almidón como indicador (HERRERA *et al.*, 2003).

### **2.5. Viscosidad**

Las fuerzas de atracción que mantienen las moléculas a distintas ínfimas dando a los líquidos suficiente cohesión determinan que estos al fluir a través de un tubo produzcan fricción. La resistencia que el líquido ofrece al flujo se denomina viscosidad. Los líquidos tienen coeficientes de viscosidad invariablemente más altos que los gases. Como quedo establecido, la viscosidad de los gases aumenta con la temperatura y es independiente de la presión. En cambio, la viscosidad de los líquidos disminuye a medida que aumenta la temperatura y decrece la presión. En el análisis del fenómeno se establece que la velocidad con la que las capas de un líquido fluyen aumente a medida que

crecen las distancias de las capas del líquido en dirección normal a las paredes del conducto (RAMIREZ, 2006).

### **2.5.1. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.**

Según HERMIDA (2000), los cuerpos deformables presentan dos comportamientos externos que son elástico y el viscoso, entre los cuales puede existir gama muy amplia, vulgarmente conocida como comportamientos elásticos y viscosos.

Según ALVARADO y AGUILERA (2001), los alimentos debido a su gran variedad en estructura y composición presentan características reológicas, que van desde una simple conducta newtoniana a una no newtoniana que puede ser dependiente o independiente del tiempo, como también viscoelástico. Incluso un mismo alimento puede exhibir conducta newtoniana, dependiendo de su origen, concentración y de otras propiedades que tienen relación con interacciones moleculares.

Los fluidos newtonianos poseen una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado ( $\sigma$ ) y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) resultante. Lo anterior, indica una viscosidad ( $\mu$ ) constante a diferentes velocidades de corte; cuando no presenta tal característica, entonces se denominan fluidos no newtonianos y acorde a su dependencia con el tiempo se identifican como reopéctico o tixotrópico (REGALADO y NORIEGA, 2009).

Según REGALADO y NORIEGA (2009) los principales modelos matemáticos para los fluidos son los que se indican en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Principales modelos matemáticos para fluidos. Esfuerzo cortante ( $\tau$ ), velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), índice de consistencia ( $k$ ) e índice de comportamiento de flujo.

Tipo de flujo	Ecuaciones
Fluido ideal de Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Ley de Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Ley de Ostwald	$\tau = k(\dot{\gamma})^n$

Fuente: REGALADO y NORIEGA (2009).

### 2.5.2. Determinación de las constantes reológicas fundamentales, $K$ y $n$ , con viscosímetros rotacionales y el método MITSCHKA.

Según MARTINEZ (2002), Mitschka en 1982 desarrolló una técnica simple para calcular el esfuerzo cortante y la relación de deformación promedio a partir de los datos obtenidos con viscosímetros Brookfield RVT. Esto permite la estimación de la viscosidad aparente, índice de comportamiento de flujo, y del coeficiente de consistencia de fluidos que obedecen a la ley de potencia. Este procedimiento está basado en estudios teóricos, publicados en Checoslovaquia y citados por Mitschka (1982), de flujo rotacional de materiales reológicamente complejos alrededor de cuerpos con geometría simple en configuraciones viscosimétricas básicas. Las aplicaciones reométricas de estos estudios se apoyan en algunas reglas empíricas, las cuales hacen posible obtener resultados concretos para sistemas axisimétricos reales del tipo “husillo rotatorio-contenedor de muestra”, Briggs y Steffe (1997) determinaron exitosamente el comportamiento pseudoplástico de puré de plátano, vinagreta (salsa compuesta

de aceite, cebolla y vinagre, que se usa fría con los pescados y con la carne), salsa para enchilada, y jarabe para panqueque utilizando el viscosímetro Brookfield RVT y concluyeron que el denominado método Mitschka puede constituir la base de una metodología simple y de bajo costo aplicable en control de calidad de una gran diversidad de alimentos.

### **2.5.3. Variación de la viscosidad con la temperatura**

Aparte de depender de la velocidad de cizalla y del tiempo de aplicación de la misma, la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura. La mayoría de los materiales disminuyen su viscosidad con la temperatura; la dependencia es exponencial y puede haber variaciones de hasta 10 % por cada °C modificado, por ejemplo, la sensibilidad a la temperatura del agua es de 3 % por grado centígrado ambiente, así que para tener una precisión del 1 % se requiere que la temperatura sea regulada en 0,3 °C. Para líquidos más viscosos esta dependencia es mayor y ha de tomarse mayores precauciones en el control de la temperatura (RAMIREZ, 2006).

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. Lugar de la ejecución**

El presente trabajo de investigación se desarrolló en los laboratorios de Ingeniería de Alimentos y de Harinas, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en la ciudad de Tingo María, ubicado a 660 msnm, a 09° 18' 09 '' de latitud Sur, a 75° 59' 56 '' de longitud Oeste, con una temperatura y humedad relativa promedio de 28 °C y 84,5 % respectivamente, en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.

#### **3.2. Materiales**

Como material de análisis se utilizó aceite de almendra de palma, adquirida de Oleaginosas del Perú. S.A

##### **3.2.1. Materiales de vidrio**

Matraz Erlenmeyer de vidrio con tapa de 25, 50 y 250 mL, vaso de precipitación de 25, 50 y 600 ml, probeta de 100 mL, bureta de 10 mL, pipeta de 1, 2, 5 y 10 mL, frascos color ambar de 630 mL, termómetro digital de 0-100°C

##### **3.2.2. Equipos**

4 estufa con control de temperatura marcas MSZ 803979, BINDER, LAB LINE IMPERIAL III, SAMSUNG TOMOS, viscosímetro BROOKFIEL DV-III

ULTRA, balanza analítica Electronic Balance (ABK210), cocina eléctrica marca Practika PCE-01, baño María Gemmyco (modelo YCW-010E)

### **3.2.3. Reactivos**

Hidróxido de potasio, fenolftaleína al 1 %, tiosulfato de sodio 0,1N, yoduro de potasio, ácido acético glacial, cloroformo, almidón soluble 1 %, agua destilada, alcohol al 96 %

### **3.3. Métodos de análisis**

- Contenido de humedad (Norma Técnica Ecuatoriana, 1973)
- Impurezas en aceites (Norma Técnica Ecuatoriana, 1999)
- Índice de acidez por el método de la AOAC (1995)
- Índice de peróxido por el método de la AOAC (1995)
- Viscosidad (BROOKFIEL, 2004)

### **3.4. Análisis estadístico**

- Evaluación de índice de acidez, índice de peróxido y viscosidad cada 4 días durante almacenamiento de 28 días a temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C.

Para evaluar los resultados de acuerdo al diseño experimental se utilizó el modelo estadístico diseño completo al azar (DCA) planteado por (MONTGEMERY, 2004), con arreglo factorial 4\*8, con dos factores temperatura y tiempo con tres repeticiones.

- Variables independientes: temperatura y tiempo
- Variables dependientes: índice de acidez, índice de peróxido y viscosidad.

Los datos fueron analizados mediante el análisis de varianza (ANVA), en caso de significancia estadística se utilizó la prueba Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

- Correlación de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido mediante la regresión lineal múltiple.

Ecuación lineal múltiple:  $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e$  donde:  $Y$ =viscosidad;  $X_1$ ,  $X_2$ =índice de acidez e índice de peróxido;  $\beta_0$ =intersección;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = constante de regresión de cada variable independiente;  $e$ =error de perturbación aleatoria.

El análisis estadístico se realizó con apoyo del software IBM SPSS Statistics versión 22.

### **3.5. Metodología experimental**

#### **3.5.1. Acondicionamiento del material de análisis**

Las muestras de aceite de almendra de palma se envasaron en botellas de color ámbar de 630 ml, y almacenadas a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C.

#### **3.5.2. Evaluación durante el almacenamiento del aceite**

Se evaluaron índice de acidez, índice de peróxido y viscosidad (según los métodos descritos en el Anexo 1) cada 4 días durante 28 días.

#### **3.5.3. Determinación de los parámetros de cinética**

- **Orden de reacción (n) y constante de velocidad de reacción (k).**

Se utilizó el modelo de integración planteado por LABUZA (1997) y aplicados por SALAZAR *et al.* (2007), OSORIO (2013) y SIVINCHA (2014) entre otros, para determinar el orden de reacción de deterioro de las muestras de

aceite según los factores de calidad evaluados. Este método consiste en elegir un orden de reacción (n) igual a cero, uno y dos e integrar la ecuación:

$$\pm \frac{dA}{d\theta} = kA^n$$

Para n = 0 se tiene  $A = A_0 + Kt$

Para n = 1 se tiene  $\ln A = \ln A_0 + Kt$

Para n = 2 se tiene  $\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} + Kt$

En las ecuaciones indicadas se reemplazaron los valores experimentales de A y t, regresionando linealmente, para luego escoger el modelo que mejor se ajuste a lo planteado en base al coeficiente de correlación ( $R^2$ ).

Una vez determinado el orden de reacción, se determinó el valor de la constante de velocidad de reacción (k) que es igual al valor de la pendiente de la regresión.

#### - Energía de activación (Ea) usando el modelo Arrhenius.

La ecuación de Arrhenius relaciona la constante de velocidad de reacción (k) con la temperatura de trabajo de la investigación.

$$K = K_0 * e^{\frac{E_a}{RT}}$$

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{E_a}{R(T)}$$

Los valores de la constante de velocidad de reacción obtenidos experimentalmente a las respectivas temperaturas en grados Kelvin ( $^{\circ}K$ ), se ajustan al modelo de Arrhenius por regresión, luego en esta ecuación se



reemplaza el valor de la constante universal de los gases es de  $R=1,98717$  cal.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> y se despeja la energía de activación ( $E_a$ ).

### **3.5.3. Simulación del deterioro del índice de acidez, e índice de peróxido.**

Con la ecuación de Arrhenius obtenida, se predijo el valor de  $K$  a las posibles temperaturas de almacenamiento.

El valor obtenido de  $k$  es reemplazado en la ecuación de pérdida de calidad ya determinada anteriormente, según el orden de reacción que más se ajustan a los valores experimentales, con los valores iniciales de los parámetros de calidad evaluados ( $A_0$ ) se simuló cada a 30 °C, hasta alcanzar los valores máximos de calidad establecidos por las normas nacionales e internacionales, para el índice de acidez (4 mg de KOH/Kg de aceite) y para el índice de peróxido (10 meq de O<sub>2</sub>/g de aceite) según (CODEX, 2009).

### **3.4.4. Obtención de los parámetros de viscosidad a través del método MISCKA (1982) indicado por MARTINEZ (2002).**

Se realizaron pruebas con los distintos spines con el fin que la lectura se ajuste a valores de 10 % a 100 % de torque, el que se ajustó fue el husillo número 1 y las velocidades fueron de 40 a 130 rpm, obteniéndose datos de porcentaje de torque y viscosidad newtoniana del equipo.

Para determinar la viscosidad, el tipo de fluido e índice de flujo se usó el método MISCKA el cual se basa en el uso de constantes para cada husillo, y con ello permitió el cálculo de los parámetros de la viscosidad.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características fisicoquímicas del aceite de almendra de palma (*Elaeis guineensis*)

En el Cuadro 4, se muestra los resultados de las características fisicoquímicas de la muestra de aceite de almendra de palma.

Según CODEX (2009), los límites máximos de calidad del aceite son: ácidos grasos 1,43 % de ácido láurico, de 0,2 % como máximo de humedad y de 0,05 % como máximo de impurezas.

Al respecto el porcentaje de ácidos grasos y humedad se encuentran debajo del límite máximo sin embargo la muestra utilizada presentó 0,5 % de impurezas, superior al límite máximo permitido.

**Cuadro 4.** Características fisicoquímicas de la muestra de aceite de almendra de palma

Indicadores	%
Acido grasos	0,760
Humedad	0,039
Impurezas	0,500

#### **4.2. Evaluación del índice de acidez durante almacenamiento.**

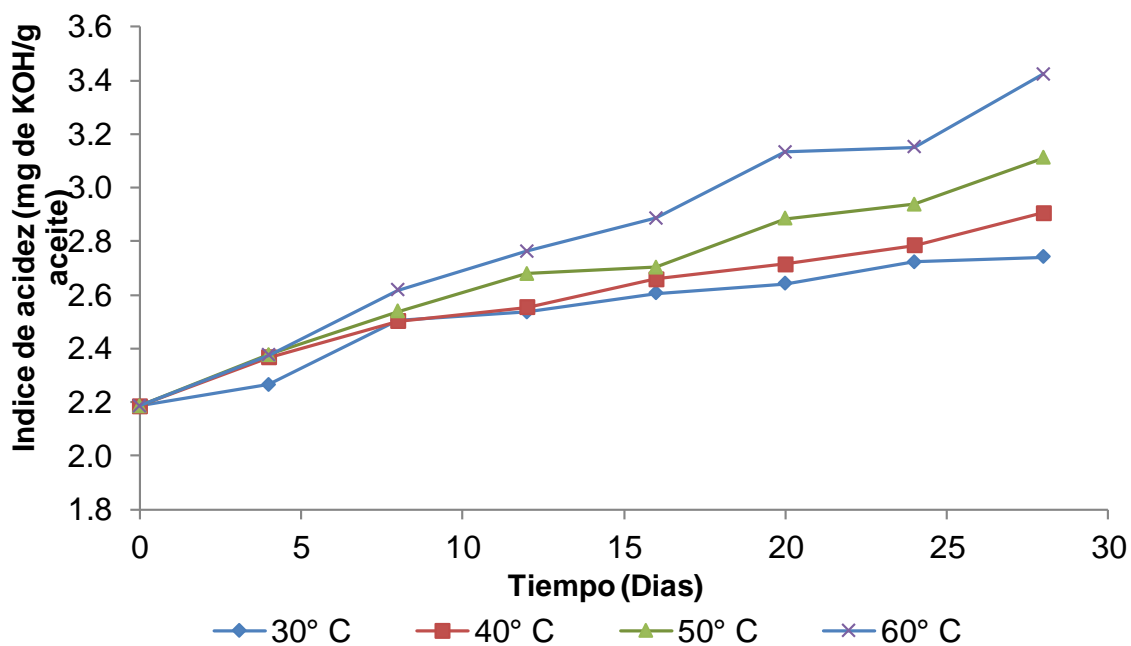
En el Cuadro 5 y en la Figura 3, se observa un incremento en forma lenta de índice de ácidos grasos (mg de KOH/g de aceite). El índice mayor se presenta a temperaturas elevadas. Este incremento de pequeñas proporciones de ácido libre le confiere acidez a los aceites y grasas dependiendo de la mayor concentración y la temperatura elevada en las que se encuentren (GONZALEZ *et al.* 2011).

Con el tiempo de almacenamiento también ocurre la hidrólisis autocatalítica que es un proceso lento donde los AGL (Ácidos Grasos Libres) por ejemplo en el aceite de palmiste se duplican solo después de 6 ó 7 meses, así el rápido aumento de los AGL se puede atribuir a microorganismos lipolíticos (TANG, 1992).

En el almacenamiento del aceite de almendra de palma, es necesario considerar la presencia de cierta cantidad de humedad, que es una condición necesaria para que se produzca un hidrólisis autocatalítica, el hidrólisis se activa aún más si la humedad del aceite final va acompañada de temperatura elevada (BELTRAN, 1991).

**Cuadro 5.** Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.

Tiempo (Días)	Índice de acidez (mg KOH /g Aceite)			
	30°C	40°C	50°C	60°C
0	2,1850	2,1850	2,1850	2,1850
4	2,2661	2,3659	2,3765	2,3751
8	2,5037	2,5025	2,5379	2,6182
12	2,5368	2,5542	2,6798	2,7625
16	2,6047	2,6588	2,7031	2,8850
20	2,6420	2,7146	2,8832	3,1323
24	2,7234	2,7835	2,9372	3,1502
28	2,7407	2,9054	3,1099	3,4224



**Figura 3.** Valores del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas.

En el Cuadro 6, luego de realizar un análisis de varianza (ANVA) que se muestra en el Cuadro 17 del Anexo 2, se muestra la comparación de medias según tukey, en donde se observa que las medias de los índices de acidez a temperaturas 30°, 40° y 50°C son similares, mientras que existe diferencia significativa con muestras almacenadas a 60°C. Esto indica que la temperatura es un factor de deterioro y que afecta al proceso de oxidación de los aceites (FENEMA, 2000).

**Cuadro 6.** Efecto de la temperatura, en el índice de acidez en almacenamiento del aceite de almendra de palma.\*

Temperatura de almacenamiento(°C)	cantidad	Promedio índice de acidez (mg de KOH/ g de aceite).	
		1	2
30	24	2,5253	
40	24	2,5837	
50	24	2,6766	2,6766
60	24		2,8163
Sig.**		0,277	0,346

\*Prueba Tukey ( $p \leq 0,05$ ) con  $n=3$ .

\*\*El valor p calculado indica en cada columna no existe significación estadística, la columna 1 y 2 difieren estadísticamente.

#### 4.3. Parámetros de cinética para el índice de acidez.

##### 4.3.1. Determinación del orden de reacción (n) y constante de velocidad de reacción (k) para el índice de acidez.

En el Cuadro 7, se aprecia que los valores ajustados al modelo de cinética de orden cero, uno y dos. El ajuste al orden cero tiene coeficientes de determinación mayores en todas las temperaturas próximas a uno.

Investigación de GONZALES *et al.* (2011) sobre evaluación de parámetros de deterioro de aceites comestibles salvadoreños en el freído, el modelo de cinética de reacción planteado está representado por una ecuación de orden cero para la acidez libre, indicando que la velocidad de reacción no depende de la concentración de ácidos grasos libres. Esto implica que lo único que afectará la velocidad de descomposición serán factores externos al aceite que intervengan tales como: temperatura, y tiempo y lugar de almacenamiento

Según SALAZAR *et al.* (2007), indica que el aceite de semilla de la palma de Coroba, la cinética de deterioro del aceite con respecto al índice de acidez presentó un comportamiento de orden cero.

Según LEÓN *et al.* (2003), en su investigación sobre la cinética de la reacción de elaidización del ácido oleico durante la desodorización y/o refinación física industrial de las grasas comestibles, ha determinado el orden de formación del ácido eláico que corresponde al orden cero.

**Cuadro 7.** Constante de velocidad de reacción (k) del índice de acidez del aceite de almendra de palma.

Temperatura (°C)	Orden 0		Orden 1		Orden 2	
	k	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>
30° C	0,0198	0,9129	0,0080	0,8973	0,0033	0,8808
40° C	0,0234	0,9705	0,0092	0,9566	0,0036	0,9387
50° C	0,0308	0,9785	0,0117	0,9670	0,0045	0,9496
60° C	0,0423	0,9851	0,0153	0,9759	0,0056	0,9579

En el Cuadro 8 se muestra la velocidad de reacción (k) del índice de acidez acondicionadas para el ajuste al modelo de Arrhenius ajustada al orden cero, uno y dos.

**Cuadro 8.** Constante de velocidad de reacción (k) del índice de acidez, acondicionadas para el ajuste al modelo de Arrhenius.

Temperatura		Constante de velocidad de reacción (k)			
T	° K	1/° K	Orden 0	Orden 1	Orden 2
30	303	0,0033	0,0198	0,0080	0,0033
40	313	0,0032	0,0234	0,0092	0,0036
50	323	0,0031	0,0308	0,0117	0,0045
60	333	0,0030	0,0423	0,0153	0,0056

Los ajustes de las velocidades de reacción (k) a cada uno de los órdenes llevados al modelo de Arrhenius, para determinar la constante de velocidad inicial (K<sub>0</sub>), energía de activación (E<sub>a</sub>) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) se muestran en el Cuadro 9.

La energía de activación encontrado fue de 5,0792 kcal /mol para el orden de reacción cero con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup>=0,9742, menor a la energía que determinó SALAZAR *et al.* (2007), al estudiar la cinética de deterioro del aceite de palma de Coroba que presento energía de activación de 12,37 Kcal/mol.

**Cuadro 9.** Parámetros de Arrhenius del índice de acidez del aceite de almendra de palma a diferentes temperaturas.

Orden de reacción (n)	Ko	Ea (Kcal/mol)	R <sup>2</sup>
0	87,284	5,0792	0,9742
1	10,364	4,3400	0,9728
2	1,3601	3,6564	0,9702

#### 4.4. Simulación de la cinética de degradación para el índice de acidez del aceite de almendra de palma.

BADUI (2006), menciona a medida que se reduce la actividad de agua la oxidación disminuye hasta un cierto punto donde la capa monomolecular se puede dañar ocasionando el ingreso del oxígeno, que inmediatamente comienza a incrementarse el proceso oxidativo, por lo tanto no es posible predecir la vida útil fuera del rango del trabajo por que las reacciones son distintas, por esta razón la simulación se hizo entre 30 y 60°C. Para alcanzar el límite máximo de índice de acidez que es de 4 mg KOH/g de aceite simulando a 30°C obtenemos lo siguiente:

Por ejemplo, para 30°C (303°K)

Modelo de Arrhenius  $K = K_0 * e^{-E_a/RT}$ ; obtenido  $K = 87,284 * e^{-2556/T}$

Reemplazando la temperatura:

$$K_{30^{\circ}\text{C}} = 87,284 * e^{-2556/303} ; K_{30} = 0,0189$$

Calculando el tiempo en el límite máximo del índice de acidez que es de (4 mg KOH/g de aceite);



Orden de reacción cero:  $IA = IA_0 + K * t$  ; obtenido  $IA=IA_0+0,0189*t$  ;

$IA_0=2,1850$

$4 = 2,1850 + 0,0189 * t$  ;  $t=96$  días.

El tiempo para alcanzar el máximo valor de índice de acidez a 4 mg de KOH /g de aceite 30°C fue de 96 días obteniéndose valores muy similares con la investigación realizado por SALAZAR *et al.* (2009), donde el tiempo de vida útil del aceite de la semilla del fruto de la palma Coroba crudo, se ubicó en 109,5 días (3,65 meses) a 25° C.

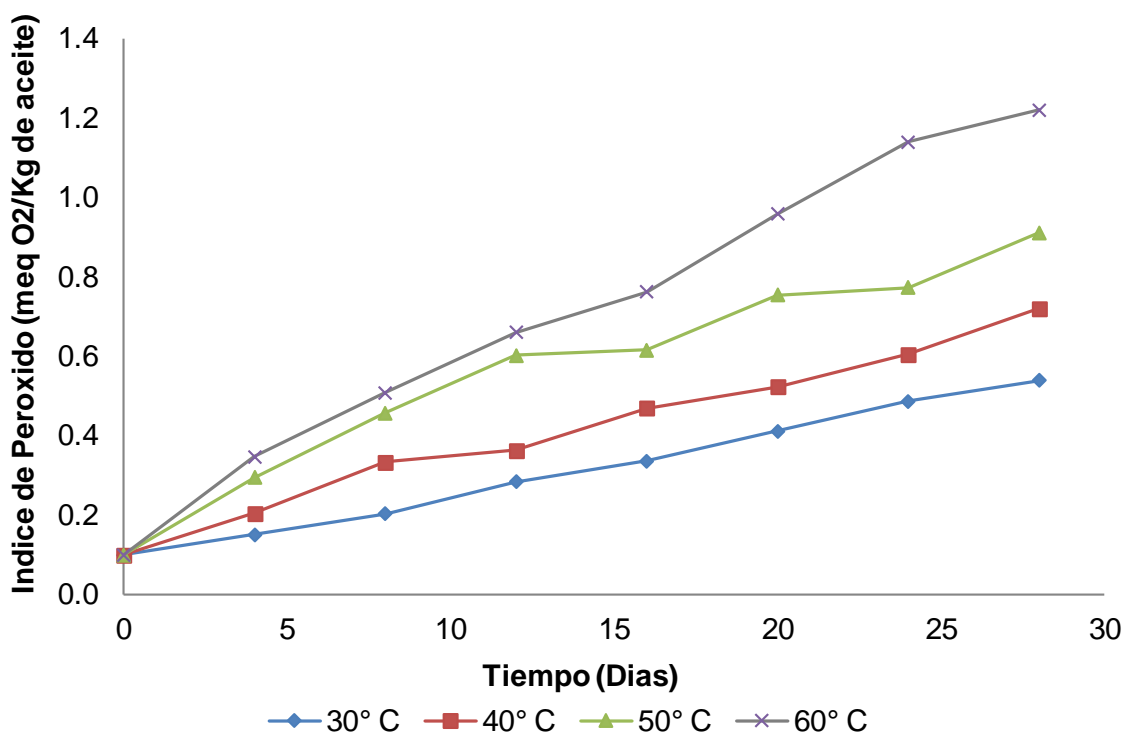
#### **4.5. Evaluación del índice de peróxido durante almacenamiento.**

En el Cuadro 10 y Figura 4, se observa el incremento de los valores de índice de peróxido durante el almacenamiento a altas temperaturas.

GONZALEZ *et al.* (2011), menciona las altas temperaturas aceleran la oxidación de los ácidos grasos especialmente por encima de 60°C, de modo que la velocidad de oxidación se duplica por cada 15 °C de aumento. (ver Cuadro 18 del Anexo 2).

**Cuadro 10.** Variación del índice de peróxido en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.

Tiempo (Días)	Índice de peróxido (meq O <sub>2</sub> /Kg de aceite)			
	30° C	40° C	50°C	60°C
0	0,0998	0,0998	0,0998	0,0998
4	0,1500	0,2044	0,2949	0,3464
8	0,2031	0,3334	0,4572	0,5075
12	0,2837	0,3627	0,6029	0,6604
16	0,3363	0,4694	0,6162	0,7626
20	0,4115	0,5235	0,7537	0,9582
24	0,4862	0,6046	0,7731	1,1401
28	0,5384	0,7212	0,9110	1,2210



**Figura 4.** Variación del índice de peróxido en almacenamiento a diferentes temperaturas.

En el Cuadro 11, se muestra la comparación de medias del índice de peróxido por efecto de la temperatura, por el método tukey. Del cual se afirma que a medida que se incrementa la temperatura también lo hace el índice de peróxido. Las medias del índice de peróxido de 30°C difieren significativamente con 50° y 60°C, esto indica que a medida que se incrementa la temperatura, el proceso de oxidación se acelera.

**Cuadro 11.** Efecto de la temperatura, en el índice de peróxido en almacenamiento del aceite de almendra de palma. \*

Temperaturas de almacenamiento (°C)	Cantidad	Promedio índice de peróxido (meq O <sub>2</sub> /kg de aceite)		
		1	2	3
30	24	0,313625		
40	24	0,414892	0,414892	
50	24		0,563613	0,563613
60	24			0,712008
Sig.**		0,539	0,207	0,209

\*Prueba Tukey ( $p \leq 0,05$ ) con  $n=3$ .

\*\*El valor p calculado indica en cada columna no existe significación estadística, la columna 1,2 y 3 difieren estadísticamente.

#### 4.6. Parámetros de cinética para el índice de peróxido

##### 4.6.1. Determinación del orden de reacción (n) y constante de velocidad de reacción (k) para el índice de peróxido

En el Cuadro 12, los datos de índice de peróxido se ajustaron al modelo de cinética de orden cero, uno y dos, de donde se observa que el coeficiente de determinación del índice de peróxido se ajusta al orden cero con un promedio igual a  $R^2=0,9817$ .

Este dato coincide con OSORIO (2013), quien estudio la cinética de oxidación de la manteca MANPAN (aceite de palma), correspondiendo los valores de índice de peróxido a orden de reacción cero, con  $R^2=0,9813$ .

SIVINCHA (2014), estudio la cinética y simulación del deterioro del aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis*); encontrado que el índice de peróxido se ajusta al orden cero con un  $R^2 = 0,9996$ .

**Cuadro 12.** Constante de velocidad de reacción (k) del índice de peróxido del aceite de almendra de palma.

Temperatura (°C)	Orden 0		Orden 1		Orden 2	
	K	R <sup>2</sup>	K	R <sup>2</sup>	K	R <sup>2</sup>
30	0,0162	0,9968	0,0594	0,9621	0,2626	0,8336
40	0,0209	0,9881	0,0621	0,8844	0,2397	0,6709
50	0,0267	0,9514	0,0649	0,7739	0,2249	0,5405
60	0,0395	0,9905	0,0760	0,8199	0,2305	0,5334

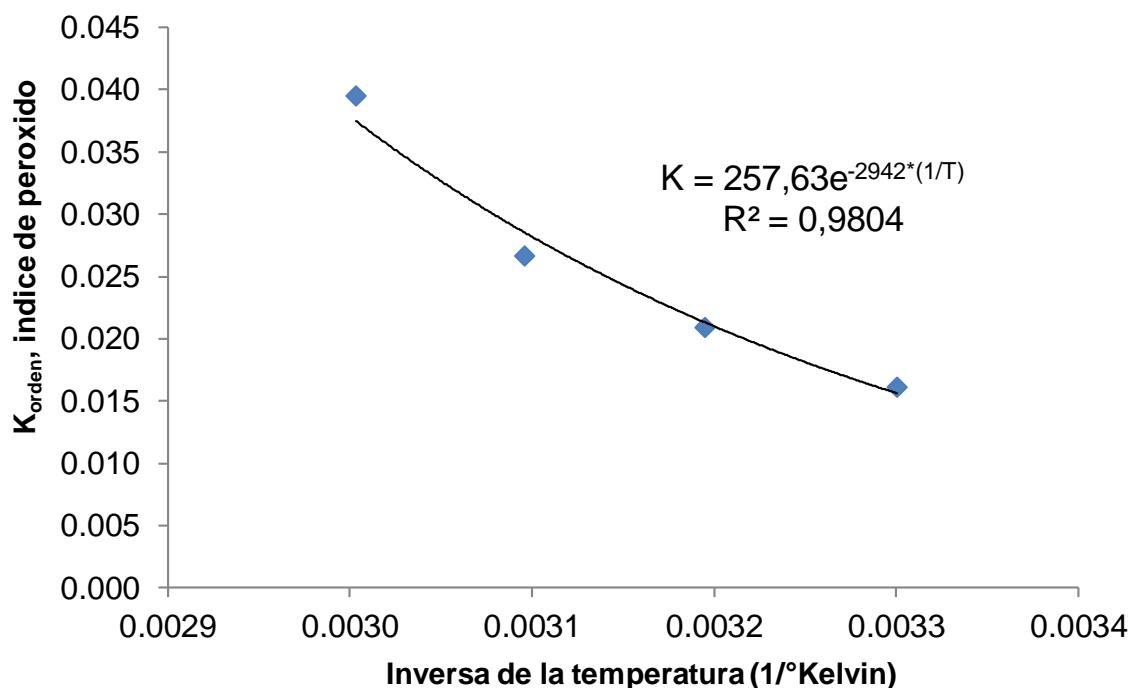
En el Cuadro 13, se observa las constantes de velocidad de reacción ajustadas al modelo de Arrhenius y en la Figura 5 se muestra las constantes de velocidades de reacción (K) del índice de peróxido de orden cero con las temperaturas, ajustada a la ecuación de Arrhenius, fue que más se ajustó con un ( $R^2=0,9804$ )

Con el modelo de Arrhenius se concluye que la energía de activación  $E_a=5,8463$  Kcal/mol para el índice de peróxido, por lo que es similar al valor obtenido por SIVINCHA (2014), de  $E_a=4,2485$  Kcal/mol del índice de acidez del aceite crudo de palma y OSORIO (2013), obtuvo un valor de  $E_a=8,4037$  Kcal/mol obtenida en manteca de palma.

**Cuadro 13.** Constante de velocidad de reacción (k) del índice de peróxido, acondicionadas para el ajuste al modelo de Arrhenius.

Temperatura		Constante de velocidad de reacción (k)			
T (°C)	°K	1/°K	Orden 0	Orden 1	Orden 2
30	303	0,0033	0,0162	0,0594	0,2626
40	313	0,0032	0,0209	0,0621	0,2397
50	323	0,0031	0,0267	0,0649	0,2249
60	333	0,0030	0,0395	0,0760	0,2305

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.** Constante de velocidad de reacción (K) del índice de peróxido de orden cero con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.

En el Cuadro 14 se muestra los parámetros de Arrhenius del índice de peróxidos, como es la energía de activación y el coeficiente de determinación.

**Cuadro 14.** Parámetros de Arrhenius del índice de peróxido del aceite de almendra de palma a diferentes temperaturas.

Orden de reacción (n)	Ko	Ea (Kcal/mol)	R <sup>2</sup>
0	257,63	5,8463	0,9804
1	0,7665	1,5540	0,8727
2	0,0552	0,9247	0,7682

#### 4.7. Simulación de la cinética de degradación del aceite de almendra de palma, en función al índice de peróxidos.

Con la ecuación de Arrhenius correspondiente a los valores de velocidad de reacción (k), se puede simular dentro del rango de estudio, que es de 30°C a 60°C, determinando el tiempo para alcanzar el máximo valor del índice de peróxido de 10 meq O<sub>2</sub>/ Kg de aceite, fue de:

Por ejemplo, para 30°C (303°K)

Modelo de Arrhenius  $K = K_0 * e^{-E_a/RT}$ ; obtenido  $K = 257,63 * e^{-2942/T}$

Reemplazando la temperatura:

$$K_{30^{\circ}\text{C}} = 257,63 * e^{-2942/303} ; K_{30} = 0,0156$$

Calculando el tiempo en el límite máximo del índice de peróxido que es de (10 meq O<sub>2</sub>/kg de aceite);

Orden de reacción cero:  $IP = IP_0 + K * t$  ; obtenido  $IP=IP_0+0,0156*t$ ;

$IP_0=0,0998$

$10 = 0,0998 + 0,0156 * t$  ;  $t=634,62$  días.

El tiempo para alcanzar el máximo valor del índice de peróxido 10 meq  $O_2/Kg$  de aceite a  $30^\circ C$  fue de 634,6 días comparando con OSORIO (2013), simulando a  $30^\circ C$  fue de 560 días, esto se debe porque los ácidos grasos insaturados que constituyen los triglicéridos (TG) del aceite de palma son el oleico (36-44%) y el linoleico (9-12%) (RINCON y MARTINEZ, 2009); comparado con el aceite de almendra de palma como menciona CODEX ALIMENTARIUS (2009), Oleico (14,8%) y linoleico (2,6%); esto causa que el aceite que contiene una gran cantidad de grasa saturada es muy estable en una gran variedad de usos alimenticios, incluyendo el horneado y la fritura. Los aceites monos y poliinsaturados son por naturaleza menos estables (VILLAMIZAR, 2005).

#### **4.8. Evaluación de la viscosidad absoluta durante almacenamiento.**

En el Cuadro 15, se muestra la variación del coeficiente de consistencia (k) almacenado a diferentes temperaturas del aceite de almendra de palma, se aprecia que existen pequeñas variaciones entre ellas, sin embargo, se observa un ligero incremento del coeficiente de consistencia de  $30^\circ C$  hasta  $60^\circ C$ .

Al respecto RINCON y MARTINEZ (2009), encontró que el coeficiente de consistencia del aceite de palma es de 0,0136 Pa.s a  $40^\circ C$  valor cercano a la viscosidad del aceite de almendra de palma a  $30^\circ C$ .



**Cuadro 15.** Variación del coeficiente de consistencia (k) en almacenamiento a diferentes temperaturas, para el aceite de almendra de palma.

Tiempo (Días)	Coeficiente de consistencia (k) (Pa.s)			
	30°C	40°C	50°C	60°C
0	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167
4	0,0204	0,0165	0,0158	0,0150
8	0,0164	0,0199	0,0165	0,0182
12	0,0188	0,0178	0,0173	0,0154
16	0,0188	0,0156	0,0188	0,0149
20	0,0206	0,0147	0,0242	0,0148
24	0,0192	0,0160	0,0220	0,0239
28	0,0163	0,0141	0,0220	0,0203

Del Análisis de Varianza (ANVA) del Cuadro 16, se afirma que no existe efecto significativo de la temperatura ( $P_{\text{valor}}=0,616$ ) y tiempo de almacenamiento ( $P_{\text{valor}}=0,218$ ) en el coeficiente de consistencia del aceite de almendra de palma.

Según MORA (2007), encontró que a temperaturas de (15°C, 20°C, 25°C, 30°C), después del freído diario no contribuye a la formación de polímeros que aumenta la viscosidad del aceite.

Según MORA (2007), menciona que la viscosidad se mide ocasionalmente para la determinación del estado de los aceites utilizados en fritura por inmersión; durante la utilización en la freidora, la viscosidad de un

aceite de fritura tendera a incrementarse a medida que lo hacen la oxidación y la polimerización.

En investigaciones en el tiempo de freído la viscosidad y el índice de refracción aumentan, indicando la formación de compuestos de cadena larga y de mayor peso molecular en el aceite, que son los que se forman en el proceso de deterioro (GONZALES *et al.*, 2011).

En la investigación de GONZALES *et al.* (2011), sobre la viscosidad concluye que los aceites Mazola (1) y Mazola (2) aumenta en función del tiempo de freído, presentando un período de crecimiento muy lento entre las horas 8 y 20 para el aceite Mazola (1), y entre las horas 8 y 24 para el Mazola (2). Este incremento en la viscosidad confirma que el aceite ha sufrido cambios a nivel molecular, formándose moléculas más largas que se entrecruzan.

**Cuadro 16.** Análisis de varianza del efecto temperatura y tiempo de almacenamiento en el coeficiente de consistencia en el aceite de almendra de palma.

Fuente	S.C	Gl	C.M	F	Pvalor
Temperatura	3,862E-05	7	5,518E-06	0,773	0,616
A:Tiempo	3,435E-05	3	1,145E-05	1,605	0,218
B>Error	1,499E-04	21	7,136E-06		
Total	2,228E-04	31			

Según las Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17,18 y 19 del Anexo 6 para el esfuerzo de corte y velocidad de deformación se utilizó el modelo potencial, ajustándose con coeficientes de correlación cercanos a uno, concordando con MORA (2007), cuyos resultados obtenidos le permitieron establecer que el modelo de potencia es más confiable para la determinación de cambios en el comportamiento reológico de aceites usados.

El incremento del esfuerzo de corte y velocidad de deformación es debido a que se trata de un fluido dilatante, confirmado por RAMIREZ (2006), que explica que los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación y esfuerzo cortante.

RAMIREZ (2006), explica que el fenómeno de dilatancia se produce debido al fase dispersa del fluido. En dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio. Si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta), ejemplos de este tipo de fluido la harina de maíz, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio. Se pueden modelizar con la ley potencial, con exponente  $n > 1$ .

El promedio general del índice de flujo es de 1,466 el cual es un fluido dilatante, uno de estos factores se habrá debido al alto % de impurezas de

la muestra que es de 0,5%, según IBARROLA (2010), indica que los fluidos dilatantes son la manteca, las arenas movedizas y las suspensiones de almidón y RAMIREZ (2006), confirma que la arena mojada es un fluido dilatante.

#### **4.9. Correlación de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido a diferentes temperaturas.**

En los Cuadros 19, 20, 21 y 22 del Anexo 3 se muestran los resultados del coeficiente de consistencias, índice de acidez, índice de peróxido a diferentes temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C. Al respecto luego del análisis estadístico de regresión lineal múltiple, el coeficiente de consistencia no se relaciona con el índice de acidez y el índice de peróxido, en las temperaturas estudiadas (ver Cuadros 23,24,25 del Anexo 3 y 26,27,28,29,30,31,32,33 y 34 del Anexo 4)

En la investigación de MASSON *et al.* (1997), la viscosidad con la cantidad de dienos conjugados y monómeros oxidados mostraron correlaciones consistentes, por su elevada correlación sería redundante la aplicación de ambos métodos para la evaluación indirecta de la alteración ya que el incremento de la formación de polímero más relacionado con la viscosidad es también paralelo a la formación de dienos conjugados y monómeros oxidados.

A partir de las correlaciones existentes entre métodos analíticos se puede deducir que, en este sector, la acidez libre y el porcentaje de dienos conjugados (o viscosidad), son útiles para predecir las cantidades de los principales grupos de nuevos compuestos presentes en los aceites de fritura poliinsaturados (MASSON *et al.*, 1997).

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los parámetros de cinética de deterioro para índice de acidez fueron: Orden de reacción=0 ( $R^2=0,9617$ ),  $E_a=5,0792$  Kcal/mol, llegando 81 días al máximo de índice de acidez (4 mg de KOH/g de aceite a 30°C).
- Los parámetros de cinética de deterioro para índice de peróxido fueron: Orden de reacción=0 ( $R^2=0,9817$ ),  $E_a=5,8463$  Kcal/mol, llegando 613 días al máximo de peróxido (10 meq O<sub>2</sub>/Kg de aceite a 30°C).
- Índice de flujo de 1,466 ( $R^2 =0,999$ ) fluido dilatante, el coeficiente de consistencia a 30°C fue de 0,0167 Pa.s en el día cero incrementándose hasta 0,0203 Pa.s a 60°C en el día veintiocho. No existe efecto significativo de la temperatura ( $P_{valor}>0,05$ ) y del tiempo de almacenamiento ( $P_{valor}>0,05$ ).

- No existe correlación de la viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido en función del tiempo y temperatura según la regresión lineal múltiple debido que el coeficiente de correlación es 0,7275 a 50°C.

## **VI. RECOMENDACIONES**

De los resultados obtenidos sobre el efecto de la cinética de deterioro sobre la viscosidad del aceite de almendra de palma, podemos recomendar lo siguiente:

- Estudiar el efecto de cinética de deterioro sobre la viscosidad en aceite utilizado en frituras, para poder correlacionar viscosidad con el índice de acidez e índice de peróxido.
- Investigar el efecto de otras variables de deterioro como los dienos y trienos sobre la viscosidad y correlacionarlo, debido que las literaturas estas variables se muestran correlacionadas.

## VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ATKINS, P. 2006. Química física. Ed. Panamericano. Oregón, Estados Unidos.  
p. 797-800.

ALVARADO, J., AGUILERA, J. 2001. Métodos para determinar propiedades en  
industrias de alimentos. Ed. Acribia. Madrid, España.

AMADO, E., MORA, Y. 2006. Análisis de la variación de la viscosidad cinemática  
de un aceite vegetal en función de la temperatura. Rev. Bistua. 4(2):54-  
59.

BADUI, S. 2006. Química de los alimentos. Cuarta Edición. Ed. Pearson. México,  
México 736 p.

BATTANER, E. 2013. Compendio de enzimología. Madrid, España. Ed.  
Universidad de Salamanca. 320 p.

BELTRAN, C. 1991. Influencia del procesamiento sobre la calidad final del aceite.  
Rev. Palmas .12 (especial):102-107.

BENJUMEA, P., ALVAREZ, A., MOLINA, A. 2006. Predicción del efecto de la  
temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus  
mezclas con diesel convencional. Rev. Energética 35 (2006): 33-38.



- BROOKFIELD.2004. Brookfield DV-III Programable Rheometer Operating Instructions. Manual N<sub>o</sub>.M/98-211-B0104.New Yord,USA.122 p.
- CASELLES, M. 2015. Química aplicada a la ingeniería. Madrid, España. ED. UNED.804P.
- CASTILLO, J.2007. Evaluación de la estabilidad oxidativa de grasas interesterificadas enzimáticamente. Tesis Ing. Químico. Bucaramanga, Colombia. Universidad industrial de Santander .p. 14-15.
- CODEX ALIMENTARIUS.2009. Normas para aceites especificados. [En línea]: ([file:///C:/Users/SONY/Downloads/CXS\\_210s\\_2015.pdf](file:///C:/Users/SONY/Downloads/CXS_210s_2015.pdf), documento 02 de abr.2016).
- DIAZ, C.2010.Velocidades de reacción. [En línea]: ([http://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad\\_de\\_reaccion2.pdf](http://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad_de_reaccion2.pdf), documentos , 05 de may. 2015)
- EUROPEAN PALM OIL ALLIANCE.2015. Historia del aceite de palma. [En línea]: ([http://www.palmoilandfood.eu/sites/default/files/European\\_Palm\\_OilAlliance-Factsheet2014-ES-DEF.pdf](http://www.palmoilandfood.eu/sites/default/files/European_Palm_OilAlliance-Factsheet2014-ES-DEF.pdf), documentos, 04 may. 2015).
- FENEMA, O. 2000. Química de alimentos. Ed. Acribia.S. A. Zaragoza, España.
- GONZALEZ, J., KLEE, R., VALLE, F.,ARTIGA, A. 2011.Evaluacion de parámetros de deterioro de aceites comestibles salvadoreños en el freído.[En línea]: Universidad centroamericana “José Simeón Cañas”, ([http://dei.uca.edu.sv/conuca/archivos/papers/6\\_Paper\\_5\\_conia2012\\_submission\\_53.pdf](http://dei.uca.edu.sv/conuca/archivos/papers/6_Paper_5_conia2012_submission_53.pdf), documentos ,20 abr.2016)

- HERMIDA, R. 2000. Fundamentos de ingeniería de procesos agroindustriales .Ed. Mundi-prensa. Madrid, España.
- HERRERA, C., BOLAÑOZ, N., LUTZ, G.2003.Química de alimentos, manual de laboratorio. San Jorge, Costa Rica. Ed. Universidad de costa rica. 104 p.
- IBARROLA, E .2010. Introducción a los fluidos no newtonianos. [En línea]:  
(<http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/introducci%C3%B3n%20no%20newtonianos.pdf>, documento, 24 de may. 2016)
- JARAMILLO.2013. Diseño de una planta agroindustrial para la extracción de aceite de palmiste en la empresa NOVAPALM S.A. Tesis Ing. Agroindustrial y de alimentos. Santiago, Chile. Universidad las Américas. 196 p.
- JUEZ, R., MOLINA, B., SANTOS, J.2004. Cultivo y producción de la palma africana en la provincia de los ríos. Tesis. Economista. Mención gestión empresarial. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica del litoral.285 p.
- LABUZA, T.2000. Accelerate shelf life testing of foods technology .39 (9):57.
- LEON, M., RUIZ,M.,GRACIANI,E. 2003. Cinética de la reacción de elaidización del ácido oleico durante la desodoración y/o refinación física industrial de las grasas comestibles. Rev. Grasas y aceite. Sevilla, España. 54 (2):138-144.

- MASSON,L.,ROBERT,P.,ROMERO,N.,IZAURIETA,M.,VALENZUELA,S.,ORTIZ ,J.,DOBARGANES,M.1997. Comportamiento de aceites poliinsaturados en la preparación de patatas fritas para consumo inmediato: Formación de nuevos compuestos y comparación de métodos analíticos. Rev. Grasas y Aceites. Santiago, Chile. 48(5):273-281.
- MORA, J.2007. Efecto de la temperatura en la variación de la viscosidad de un aceite degradado por fritura en inmersión de papas. Tesis Ing. Alimentos. Pamplona, España. Universidad de pamplona. p. 61-62.
- OSORIO, C.2013. Simulación de la cinética de oxidación de manteca MANPAN por pruebas aceleradas. Tesis Ing. Industrias alimentarias. Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. p. 52-57.
- PALMAS.2012. palma aceitera cultivo y agroindustria. [En línea]: (<http://www.bcrp.gob.pe/docs/proyeccion-institucional/encuentros-regionales/2012/ucayali/eeer-ucayali-carlos-ferraro.pdf>, documento, 20 de may. 2016).
- RAMIREZ, J.2002.Fundamentos de reología de alimentos. Cali, Colombia. Ed. Recitala .p. 8-9.
- REYES, J.2008. Desarrollo y caracterización reologica de un sistema ternario de aceites y grasas vegetales para la obtención de una cobertura libre de ácidos grasos trans de alta temperatura de fusión y capacidad de retención de fase líquida. Tesis. Dr. Ciencias y tecnología de alimentos. Querétaro, México. Universidad autónoma de Querétaro. 145 p.

- RINCON, S., MARTINEZ, D. 2009. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. Bogotá, Colombia. Rev. Palmas 30 (2):11-24.
- SALAZAR, E., BELÉN, D., MARÍN, G., MORENO, H. 2007. Cinética de deterioro del aceite de la semilla de la palma coroba (*Attalea maripa*). Rev. Ciencias básicas y tecnología. 19(2): 172-182.
- SIVINCHA. 2014. Cinética y simulación del deterioro del aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis*) en la planta extractora industrias del SHANUSI S.A. Tesis. Ing. Industrias alimentarias. Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- SOLIS, J., ZUMBADO, M. 1995. Evaluación del proceso de oxidación de la nuez de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Rev. Agronomía Costarricense 19(2) :53-58.
- REGALADO, A., NORIEGA, O. 2008. Comportamiento reológico de un flujo Ciencia y Mar, XII (36): 35-42.
- RAMIREZ, J. 2006. Introducción a la reología de los alimentos. Cali, Colombia. Ed. Recítala. 46 p.
- TORRES, J. 2003. Determinación de la estabilidad del aceite de girasol coloreado con achiote mediante pruebas aceleradas. Tesis. Ing. Industrias alimentarias. Lima, Perú. 105 p.

TANG. 1992. Calidad actual del palmiste y del aceite de palmiste. Rev. Palmas, Bogota. 13 (4):55-56.

VELASQUEZ.J., GOMEZ, A.2010. Palma africana en tabasco. [En línea]: (<http://www.archivos.ujat.mx/2011/difusion/libros/23.pdf>, documentos, 04 de may. 2016).

VEGA, A. 2004. Guía para la elaboración de aceites comestibles, caracterización y procesamiento de nueces. Ed. Convenio Andrés Bello. Bogotá, Colombia .38 p.

VILLAMIZAR, G. 2005. Composición de las grasas y Aceites. Rev. Virtual Pro: Oleoquímica. 42: 3-6.

**ANEXO**

## ANEXO 1

### INDICE DE PEROXIDO

- Preparación de reactivos: preparación de la solución cloroformo-acético, mezclar tres volúmenes de ácido acético y un volumen de cloroformo
- Preparar el IK (yoduro de potasio) saturado
- Tiosulfato de sodio al 0,1 N ó 0,01 N, preparase esta última inmediatamente antes de usarla a partir de la solución de 0,1 N con agua destilada
- Pese una muestra de 5 g en un Erlenmeyer de 250 mL con tapón esmerilado
- Añadir 30 mL de la disolución cloroformo-ácido acético, y agítese por rotación para disolver la muestra.
- Añádase 0,5 mL de la preparación de IK.
- Espérese exactamente 1 minuto agitando de vez en cuando y añádase 30 mL de agua destilada previamente hervida y enfriada.
- Titulase el yodo liberado con Tiosulfato de sodio 0,1 N, dejando caer gota a gota mientras agita vigorosamente hasta que desaparezca casi en su totalidad la coloración amarilla del yodo.
- Añádase 0,5 mL de un indicador de almidón y continúe titulando si es que aparece el color azul hasta que quede sin color.
- Paralelamente se trabaja con un blanco siguiendo todos los pasos con la diferencia que no lleva muestra.
- Si la valoración requiere menos de 0,5 mL repetir la determinación empleando solución de tiosulfato de sodio al 0,01 N.
- Calcular el valor actual utilizando la siguiente ecuación:

$$PV = ((S-B) * N * 1000) / W$$

Dónde: S es el volumen (mL) de tiosulfato de sodio requerido para valorar la muestra, B es volumen (mL) de tiosulfato de sodio requerida para el blanco, N es la normalidad calculada de la solución de tiosulfato de sodio normalizado y W es el peso de la muestra (g).

- De esta ecuación el PV se expresa como meq. de oxígeno activo/Kg de la muestra y es igual a oxígeno activo mmol/Kg de muestra.

### **INDICE DE ACIDEZ**

- Pesar 5 g de la grasa en un erlenmeyer de 100 mL
- Se adiciona 50 ml. de alcohol al 96% y 3 a 5 gotas de fenolftaleína como indicador de pH.
- El Erlenmeyer con el alcohol y fenolftaleína se calienta hasta ebullición en baño maría
- Se procede a titular en caliente con KOH al 0,1 N hasta lograr el color rosado: este color debe permanecer durante 1 minuto
- Se calcula el índice de acidez.

$$\text{Índice de acidez} = (V * M * N) / (10 * P)$$

Dónde:

V=volumen de ml de solución de KOH utilizado

N=Normalidad exacta de la solución de KOH utilizado.

M=Peso molecular de ácido en que se expresa la acidez

P=peso en g de la muestra utilizada.



**VISCOSIDAD (Brookfiel, 2004).**

- Enchufar y prender el equipo.
- Se escoge el husillo estos deben dar lecturas de 10% a 100% para poder tomar estos datos, se prueba todos los husillos a diferentes velocidades por minuto (RPM), y escogeremos al que tiene mayor rango de RPM y el cual los datos de % de torque este dentro del rango ya mencionado.
- Presionar ON/OFF para que se calibre el equipo
- Presione PROG, seguidamente 1 (DVIII), 1 ENTER/EDIT A PGM, USE SET poner el numero al programa (en este caso fue 8), luego escribir las revoluciones por minuto (RPM) y el tiempo (en esta investigación 10 s), recopila hasta 25 datos, presionamos 3 (USE SPEED SET), escribimos el número del programa en este caso es 8 , para editar número de husillo presionar SELECT SPDL y escribimos el número del husillo , luego presionamos PROG RUN , PROG RUN y luego 2=Cancel, todas las lecturas de viscosidad fueron a 30° C.

## ANEXO 2

### Análisis de varianza del efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el índice de acidez, índice de peróxido en el aceite de almendra de palma.

**Cuadro 17.** Análisis de varianza del efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el índice de acidez, en el aceite de almendra de palma.

Fuente	S.C	Gl	C.M	Razón- F	P <sub>valor</sub>
A:Temperatura	1,1597	3	0,3866	181,5737	0,0000
B:Tiempo	6,9567	7	0,9938	466,8062	0,0000
Interacción (A*B)	0,6580	21	0,0313	14,7174	0,0000
Residuos	0,1363	64	0,0021		
Total	8,9106	95			

**Cuadro 18.** Análisis de varianza del efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el índice de peróxido, en el aceite de almendra de palma.

<b>Fuente</b>	<b>S.C</b>	<b>Gl</b>	<b>C.M</b>	<b>Razon-F</b>	<b>P<sub>valor</sub></b>
A:Temperatura	2,1831	3	0,7277	251,4149	0,0000
B: Tiempo	5,4190	7	0,7741	267,4590	0,0000
Interacción (A*B)	0,6882	21	0,0328	11,3214	0,0000
Residuos	0,1852	64	0,0029		
Total	8,4755	95			

### ANEXO 3

#### Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a temperaturas de 30, 40, 50 y 60° C.

**Cuadro 19.** Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 30° C

Tiempo (Días)	Temperatura (30°C)		
	k (coeficiente de consistencia)	Índice de acidez	Índice de peróxido
0	0,0167	2,1850	0,0998
4	0,0204	2,2661	0,1500
8	0,0164	2,5037	0,2031
12	0,0188	2,5368	0,2837
16	0,0188	2,6047	0,3363
20	0,0206	2,6420	0,4115
24	0,0192	2,7234	0,4862
28	0,0163	2,7407	0,5384

**Cuadro 20.** Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 40° C.

<b>Tiempo (Días)</b>	<b>Temperatura (40° C)</b>		
	<b>k (coeficiente de consistencia)</b>	<b>Índice de acidez</b>	<b>Índice de peróxido</b>
0	0,0167	2,1850	0,0998
4	0,0165	2,3659	0,2044
8	0,0199	2,5025	0,3334
12	0,0178	2,5542	0,3627
16	0,0156	2,6588	0,4694
20	0,0147	2,7146	0,5235
24	0,0160	2,7835	0,6046
28	0,0141	2,9054	0,7212

**Cuadro 21.** Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 50° C.

<b>Tiempo (Días)</b>	<b>Temperatura (50°C)</b>		
	<b>k (coeficiente de consistencia)</b>	<b>índice de acidez</b>	<b>índice de peróxido</b>
60	0,0167	2,1850	0,0998
4	0,0158	2,3765	0,2949
8	0,0165	2,5379	0,4572
12	0,0173	2,6798	0,6029
16	0,0188	2,7031	0,6162
20	0,0242	2,8832	0,7537
24	0,0220	2,9372	0,7731
28	0,0220	3,1099	0,9110

**Cuadro 22.** Resultados del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a la temperatura de 60° C.

Tiempo (Días)	Temperatura (60°C)		
	k (coeficiente de consistencia)	índice de acidez	índice de peróxido
4	0,0167	2,1850	0,0998
4	0,0150	2,3751	0,3464
8	0,0182	2,6182	0,5075
12	0,0154	2,7625	0,6604
16	0,0149	2,8850	0,7626
20	0,0148	3,1323	0,9582
24	0,0239	3,1502	1,1401
28	0,0203	3,4224	1,2210

A continuación, en los Cuadros 26, 27, 28 explican estadísticamente la correlación del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a 30°C, en los Cuadros 29, 30, 31 explican estadísticamente la correlación del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a 40° C, en los Cuadros 32, 33 y 34 explican estadísticamente la correlación del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a 60° C del Anexo 4.

Según los resultados estadísticos de los Cuadros 23, 24 y 25 a 50°C el  $R^2 = 0,7275$  esto indica 72,75 % de la varianza del coeficiente de

consistencia (k) queda estadísticamente explicado por el índice de acidez (IA) y por el índice de peróxido (IP). Dado que el (Pvalor=0,0387), se asume que por lo menos uno de los coeficientes de regresión es diferente de cero y que existe regresión global de K con IA y el IP.

$$k = -0,0446 + 0,0286 * A - 0,0229 * P$$

Según la prueba individual de los coeficientes de regresión se observa que el (Pvalor=0,2890) del IA y (Pvalor=0,4421) del IP, se concluye que el modelo resultante no es significativo.

**Cuadro 23.** Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 50°C

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,8529
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,7275
R <sup>2</sup> ajustado	0,6185
Error típico	0,0019
Observaciones	8



**Cuadro 24.** Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 50°C

	<b>GL</b>	<b>S.C</b>	<b>C.M</b>	<b>F</b>	<b>Pvalor</b>
Regresión	2	5,0590E-05	2,5295E-05	6,6744E+00	3,8762E-02
Residuos	5	1,8949E-05	3,7898E-06		
Total	7	6,9539E-05			

**Cuadro 25.** Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 50°C.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Pvalor</b>
Intercepción	-0,0446	0,0493	-0,9047	0,4071
IA	0,0286	0,0242	1,1857	0,2890
IP	-0,0229	0,0274	-0,8344	0,4421

## ANEXO 4

### Análisis de la regresión lineal múltiple del coeficiente de consistencia con el índice de acidez e índice de peróxido a 30, 40 y 60°C.

Según los resultados estadístico a 30°C del Cuadro 26, 27 y 28 el  $R^2=0,0107$  esto indica 1,07 % de la varianza del coeficiente de consistencia (k) queda estadísticamente explicado por el índice de acidez (IA) y por el índice de peróxido (IP). Dado que el (Pvalor=0,973), se asumen que todos los coeficientes de regresión son cero y que no existe regresión global de K con IA y IP.

**Cuadro 26.** Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 30°C

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,1033
Coeficiente de determinación $R^2$	0,0107
$R^2$ ajustado	-0,3851
Error típico	0,0020
Observaciones	8

**Cuadro 27.** Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 30°C

	GI	S.C	C.M	F	Pvalor
Regresión	2	2,2515E-07	1,1257E-07	2,6964E-02	9,7354E-01
Residuos	5	2,0875E-05	4,1750E-06		
Total	7	2,1100E-05			

**Cuadro 28.** Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 30°C

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Pvalor
Intercepción	0,0224	0,0248	0,9004	0,4092
IA	-0,0020	0,0116	-0,1700	0,8716
IP	0,0031	0,0148	0,2126	0,8400

Según los resultados estadísticos a 40°C de los Cuadros 29, 30 y 31 el  $R^2 = 0,1771$  esto indica 17,71 % de la varianza del coeficiente de consistencia (k) queda estadísticamente explicado por el índice de acidez (IA) y por el índice de peróxido (IP). Dado que el (Pvalor=0,265), se asumen que todos los coeficientes de regresión son cero y que no existe regresión global de K con IA y IP.

**Cuadro 29.** Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 40°C

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,6420
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,4122
R <sup>2</sup> ajustado	0,1771
Error típico	0,0017
Observaciones	8

**Cuadro 30.** Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 40°C.

	GI	S.C	C.M	F	Pvalor
Regresión	2	9,5997E-06	4,7998E-06	1,7532E+00	2,6489E-01
Residuos	5	1,3689E-05	2,7378E-06		
Total	7	2,3289E-05			

**Cuadro 31.** Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 40°C.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Pvalor
Intercepción	-0,0298	0,0537	-0,5542	0,6033
IA	0,0228	0,0253	0,8987	0,4100
IP	-0,0306	0,0286	-1,0676	0,3345

Según los resultados estadístico a 60°C de los Cuadros 32,33 y 34 el  $R^2=0,5028$  esto indica 50,28 % de la varianza del coeficiente de consistencia (k) queda estadísticamente explicado por el índice de acidez (IA) y por el índice de peróxido (IP). Dado que el (Pvalor =0,174), se asumen que todos los coeficientes de regresión son cero y que no existe regresión global de K con IA y IP.

**Cuadro 32.** Análisis de los coeficientes de correlación de la regresión lineal múltiple a 60°C

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,7091
Coefficiente de determinación $R^2$	0,5028
$R^2$ ajustado	0,3039
Error típico	0,0027
Observaciones	8

**Cuadro 33.** Análisis de varianza de regresión lineal múltiple a 60°C.

	GI	S.C	C.M	F	Pvalor
Regresión	2	3,7488E-05	1,8744E-05	2,5280E+00	1,7432E-01
Residuos	5	3,7072E-05	7,4144E-06		
Total	7	7,4560E-05			

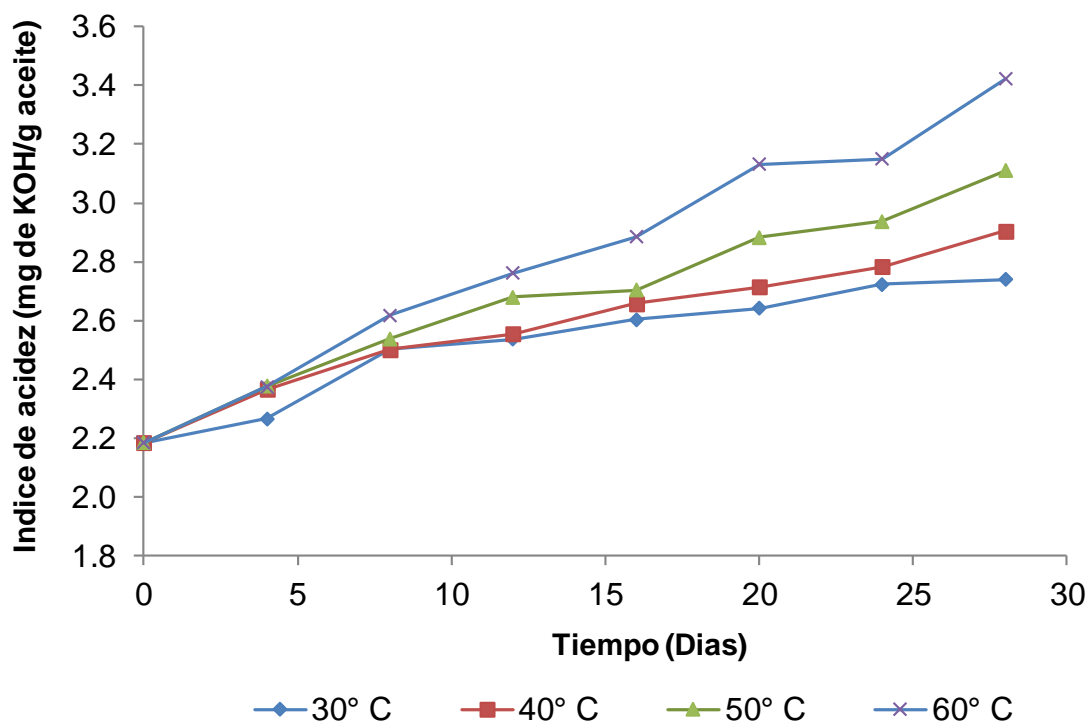
**Cuadro 34.** Análisis estadístico de los coeficientes de regresión lineal múltiple a 60°C.

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Pvalor
Intercepción	0,0662	0,0351	1,8837	0,1183
IA	-0,0252	0,0170	-1,4820	0,1984
IP	0,0313	0,0183	1,7113	0,1477

## ANEXO 5

### Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas durante almacenamiento y ordenes de reacción 0, 1 y 2.

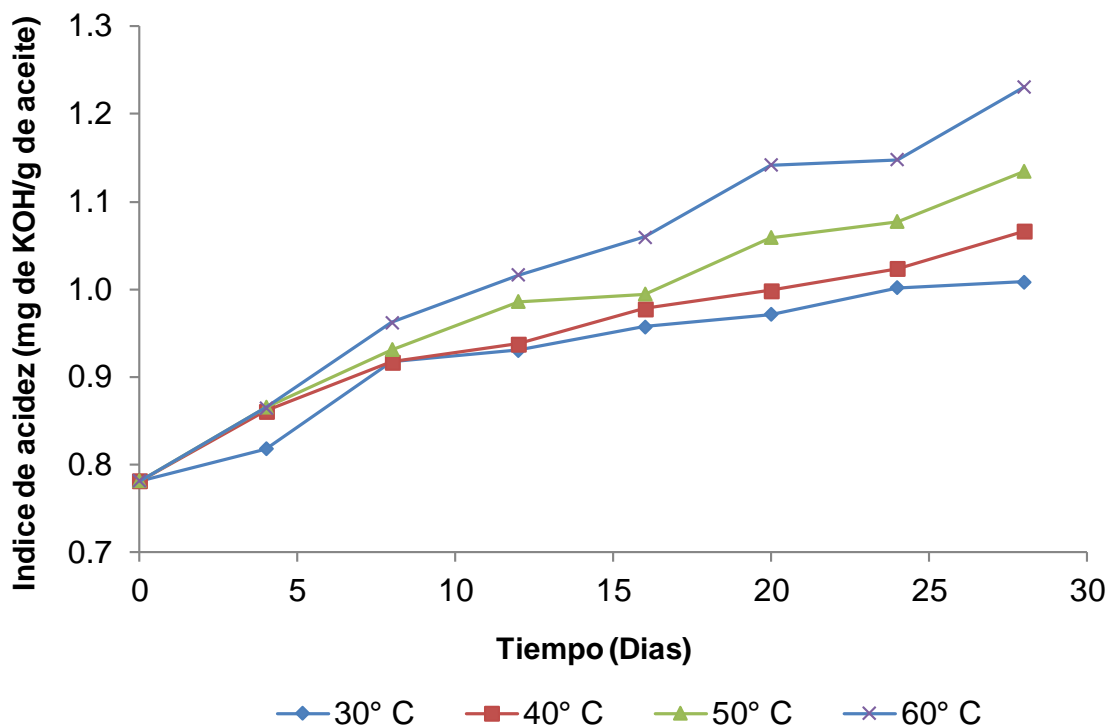
Los datos de la Figura 6 se ajusta a la ecuación de la velocidad de reacción de orden cero:  $IA = IA_0 + Kt$ , donde  $IA$  es el índice de acidez,  $IA_0$  es el índice de acidez inicial,  $k$  es constante de velocidad de reacción y  $t$  es tiempo en días.



**Figura 6.** Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción cero).

Los datos de la Figura 7 se ajusta a la ecuación de la velocidad de reacción de orden uno:  $\ln IA = \ln IA_0 + Kt$ , donde  $\ln IA$  es el  $\ln$  del índice de

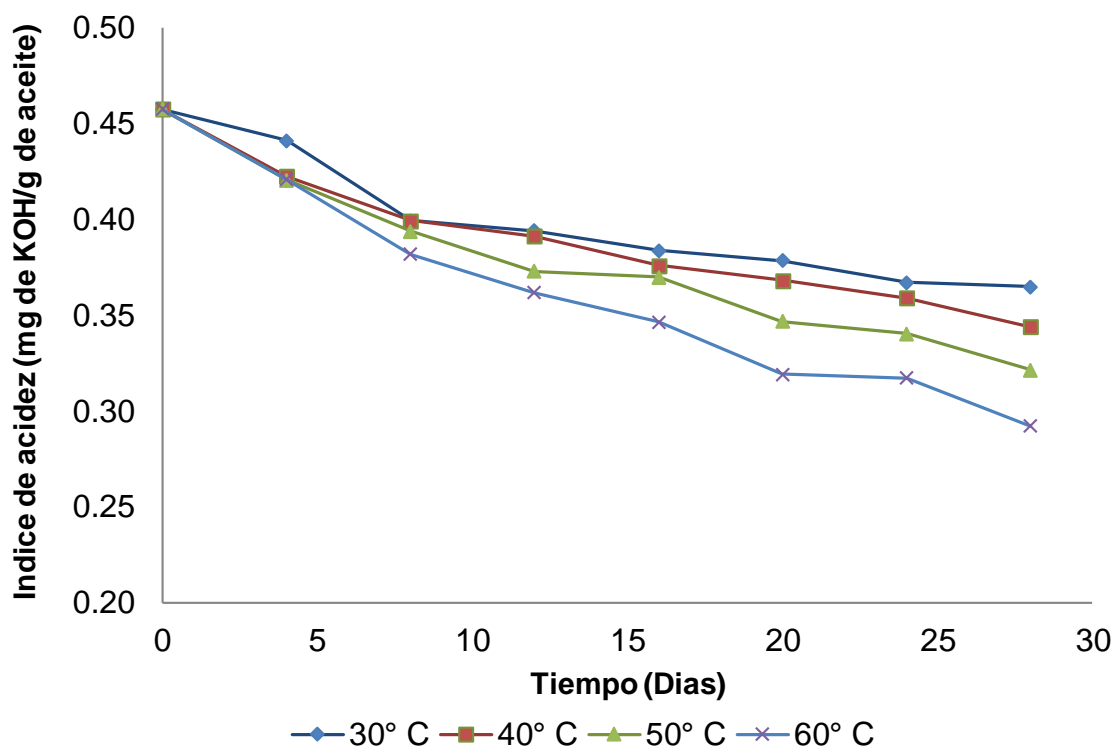
acidez,  $\ln IA_0$  es  $\ln$  del índice de acidez inicial,  $K$  es la constante de velocidad de reacción y  $t$  es tiempo en días.



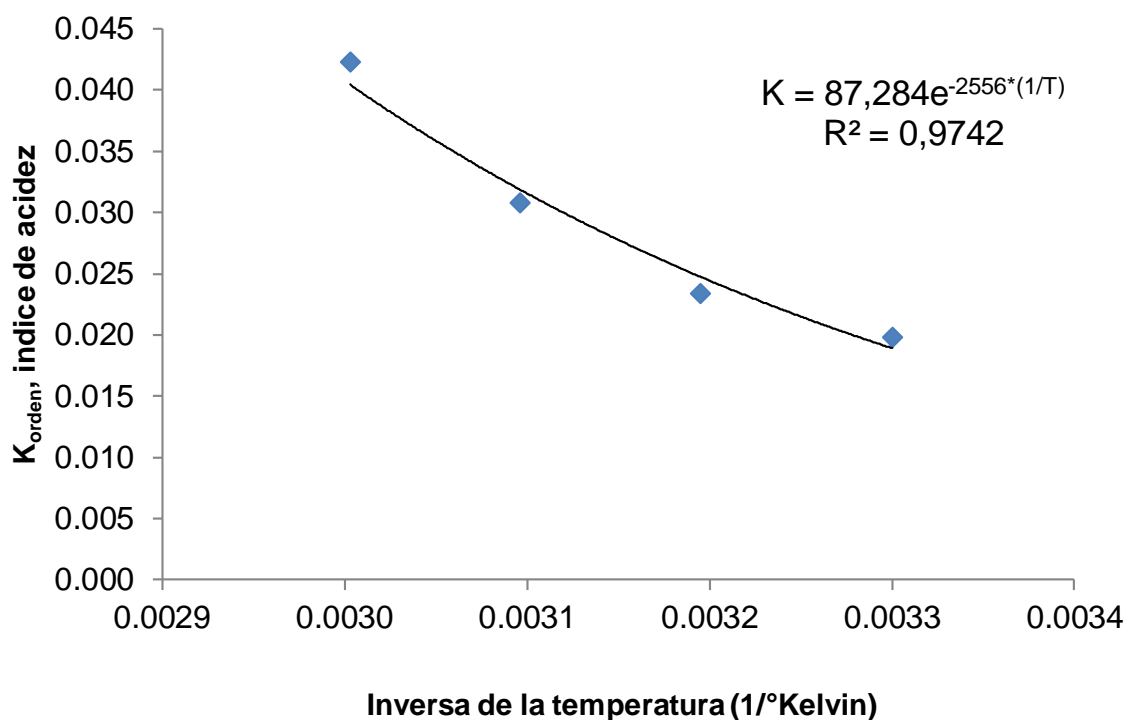
**Figura 7.** Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción uno).

Los datos de la Figura 8 se ajusta a la ecuación de la velocidad de reacción de orden dos:  $\frac{1}{IA} = \frac{1}{IA_0} - k.t$ , donde  $\frac{1}{IA}$  es la inversa del índice de acidez,  $\frac{1}{IA_0}$  es la inversa del índice de acidez inicial,  $K$  es la constante de velocidad de reacción y  $t$  es tiempo en días.





**Figura 8.** Variación del índice de acidez en almacenamiento a diferentes temperaturas. (Orden de reacción dos).



**Figura 9.** Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden cero con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.

Con los valores de velocidad de reacción (k) se regresiono al modelo de Arrhenius se determinó que la energía de activación (Ea) el cual se explica a continuación.

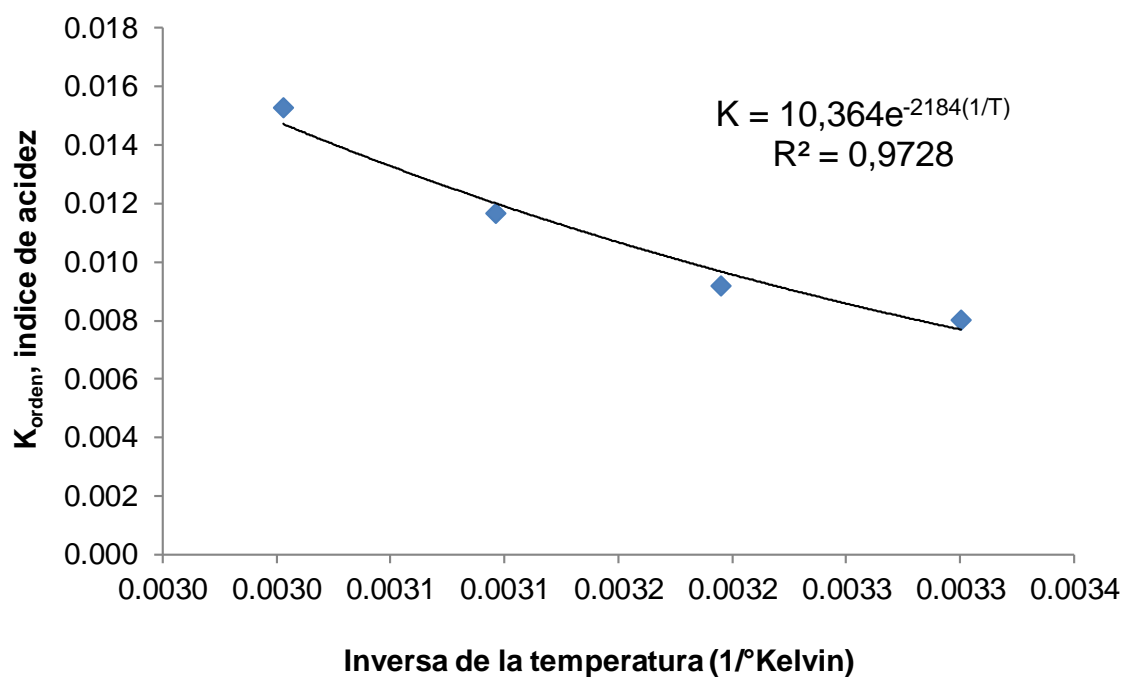
$$\text{Modelo Arrhenius: } K = K_0 * e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

$$\text{Ecuación regresionada: } Y = 87,284e^{-2556x}$$

$$\text{Entonces: } \frac{E_a}{R} = \frac{E_a}{1,98717 \text{ cal.mol}^{-1}\text{K}^{-1}} = 2556 \text{ cal/mol}$$

$$\text{Finalmente: } E_{a_{orden\ cero}} = 5,0792 \text{ Kcal/mol y}$$

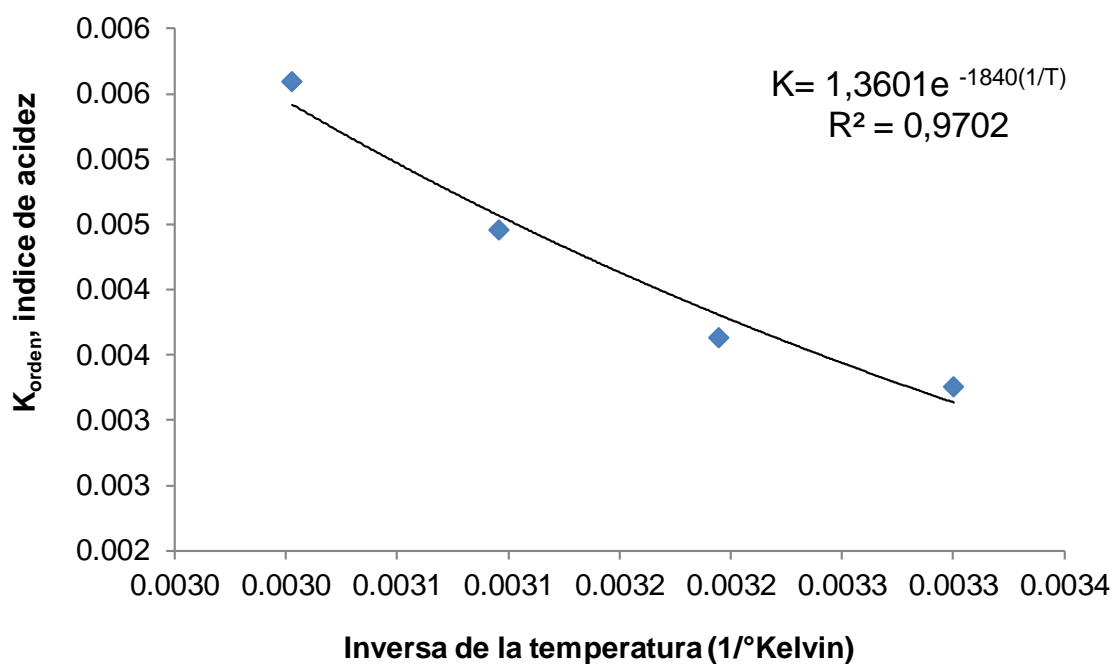
$$K_{0(orden\ cero)} = 87,284 \text{ mg KOH/(g de aceite * dia)}$$



**Figura 10.** Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden uno con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.

De la Figura 10 se obtiene:  $E_{a_{\text{orden uno}}} = 4,3400 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$

$K_{o(\text{orden uno})} = 10,364 \text{ mg KOH}/(\text{g de aceite} * \text{dia})$



**Figura 11.** Constante de velocidad de reacción (K) de índice de acidez de orden dos con la temperatura, ajustada a la ecuación de Arrhenius.

De la Figura 11 se obtiene:

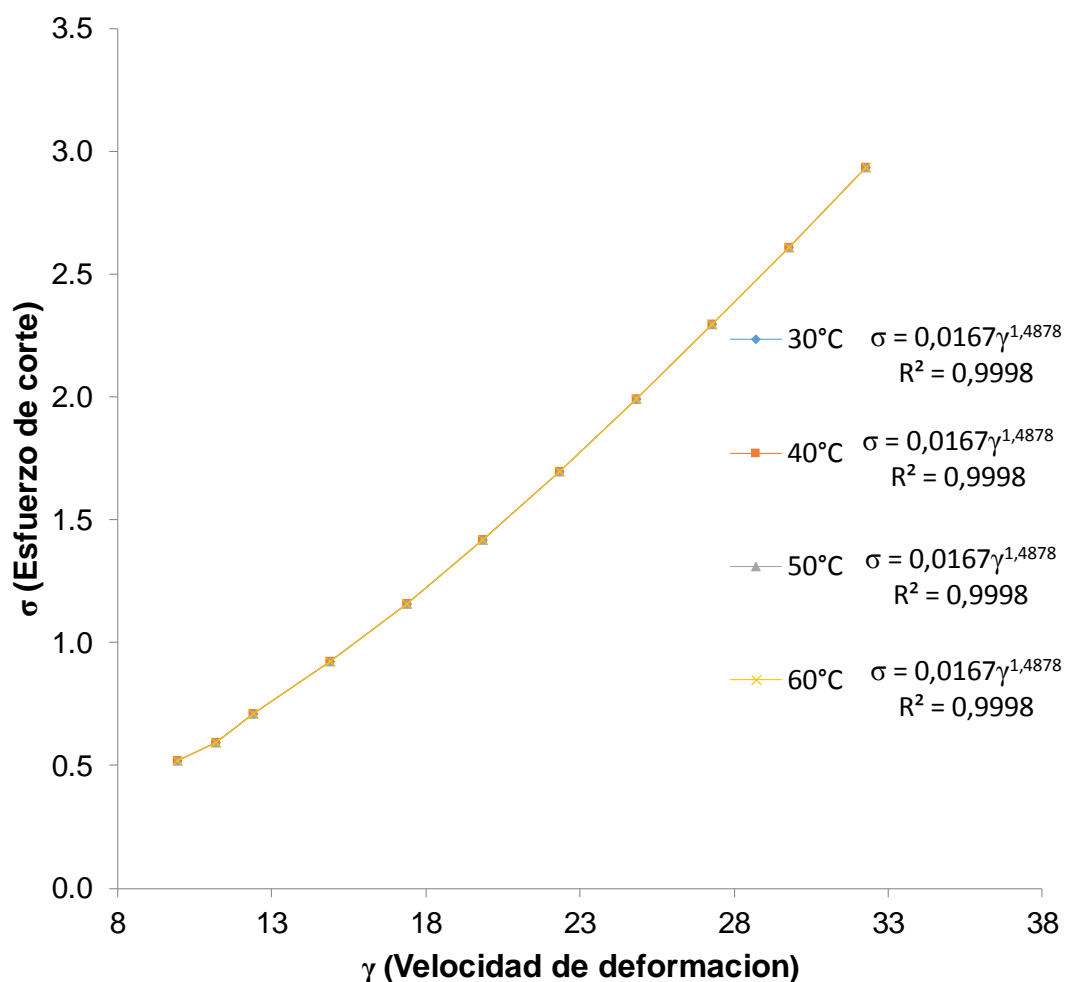
$$E_{a_{\text{orden dos}}} = 3,6564 \text{ Kcal/mol y}$$

$$K_{o_{(\text{orden dos})}} = 1,3601 \text{ mg KOH/(g de aceite * dia)}.$$

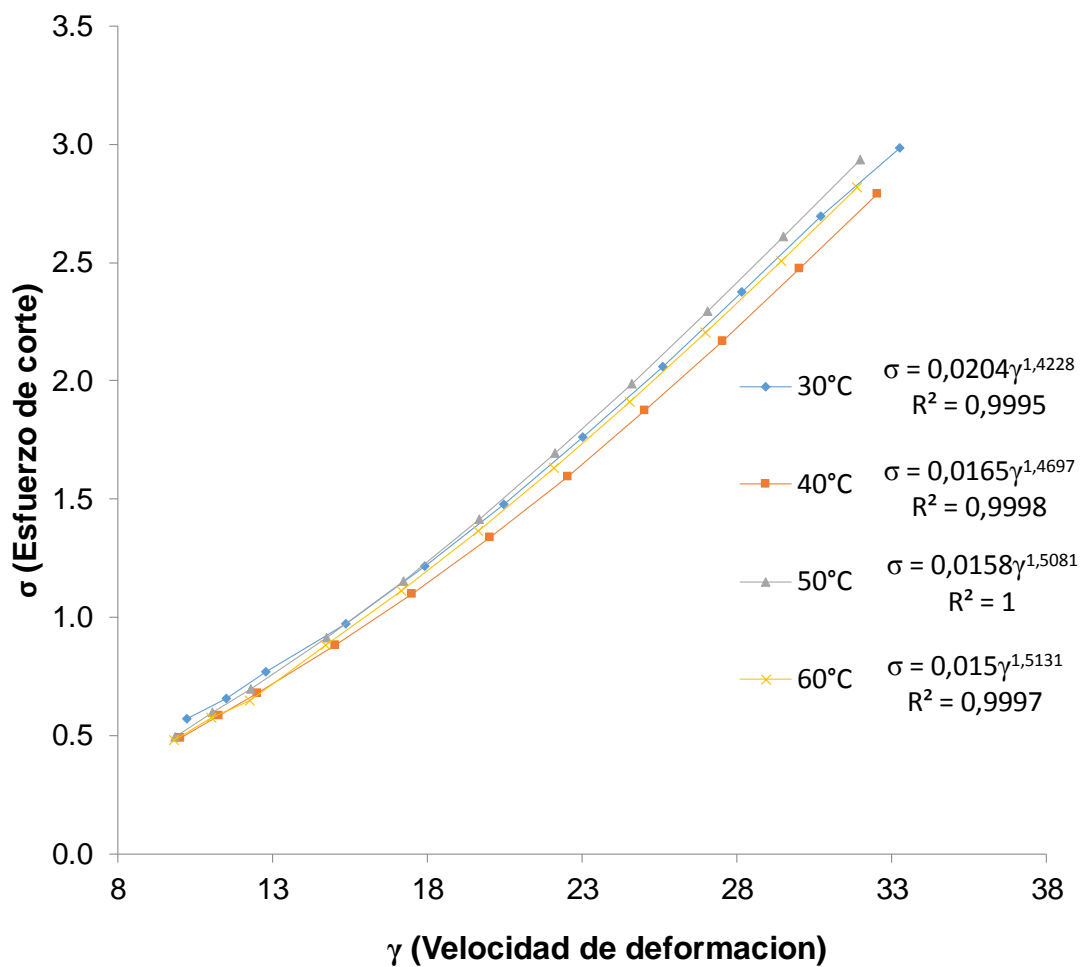
## ANEXO 6

### Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas evaluadas cada cuatro días durante veintiocho días de almacenamiento

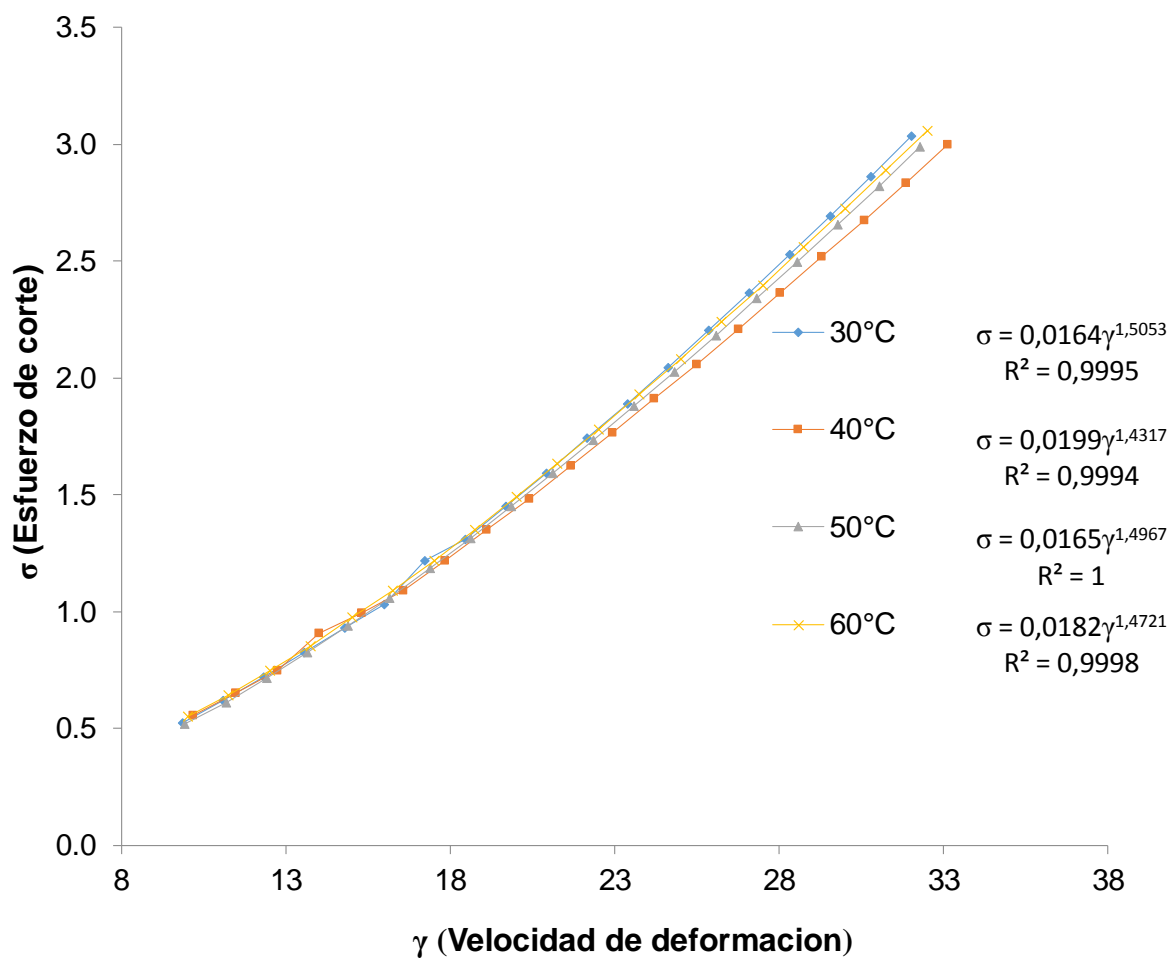
En las siguientes Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 nos muestran en la ecuación según de la viscosidad de acuerdo a la ley de la potencia, graficando esfuerzo de corte con velocidad de deformación.



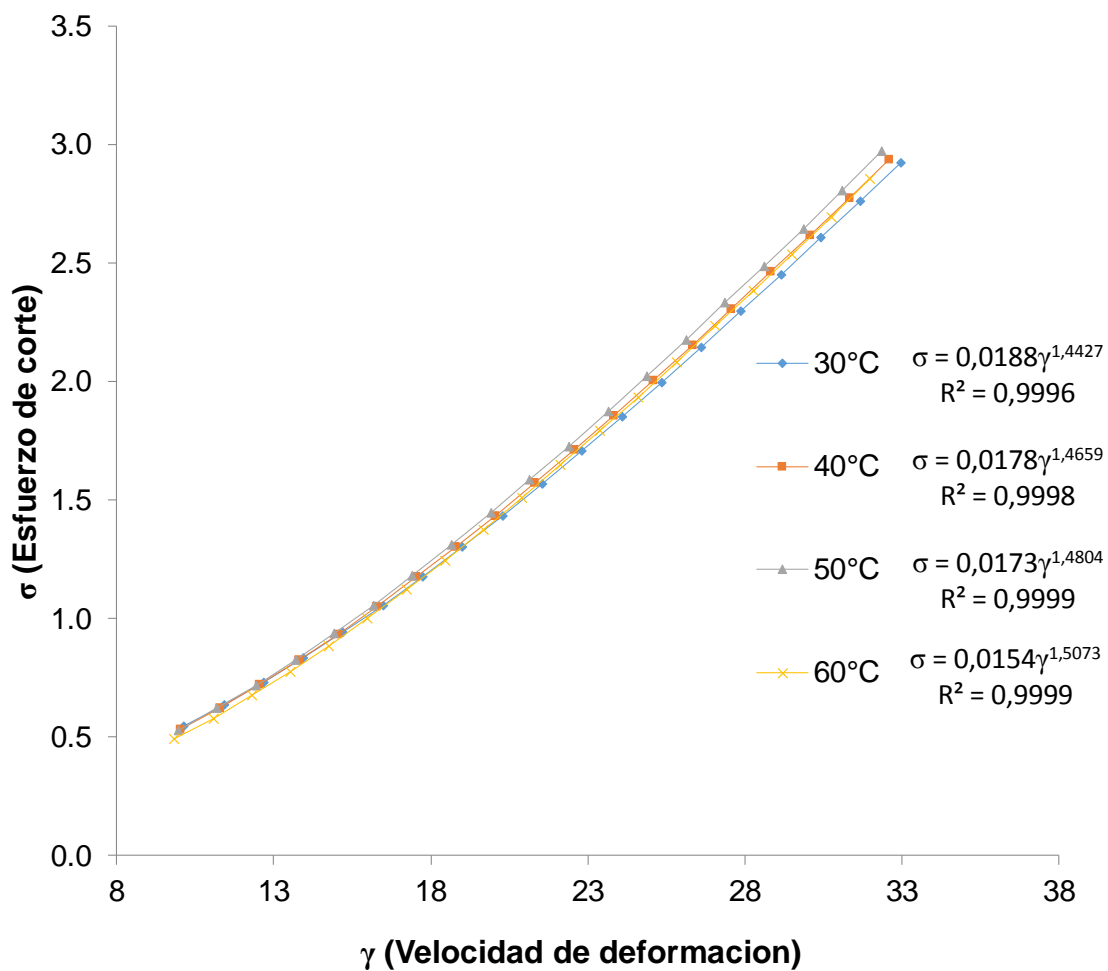
**Figura 12.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día cero de la evaluación.



**Figura 13.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día cuatro de la evaluación.

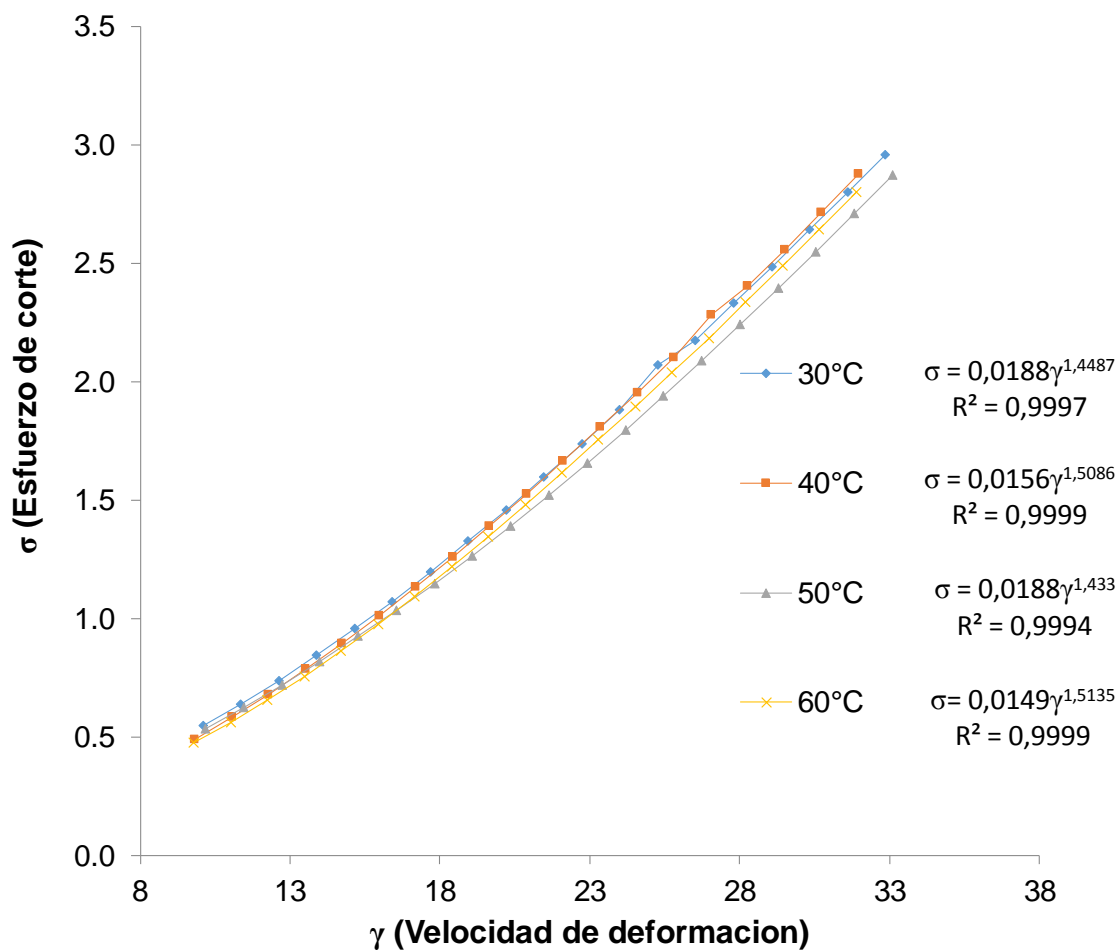


**Figura 14.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día ocho de la evaluación.

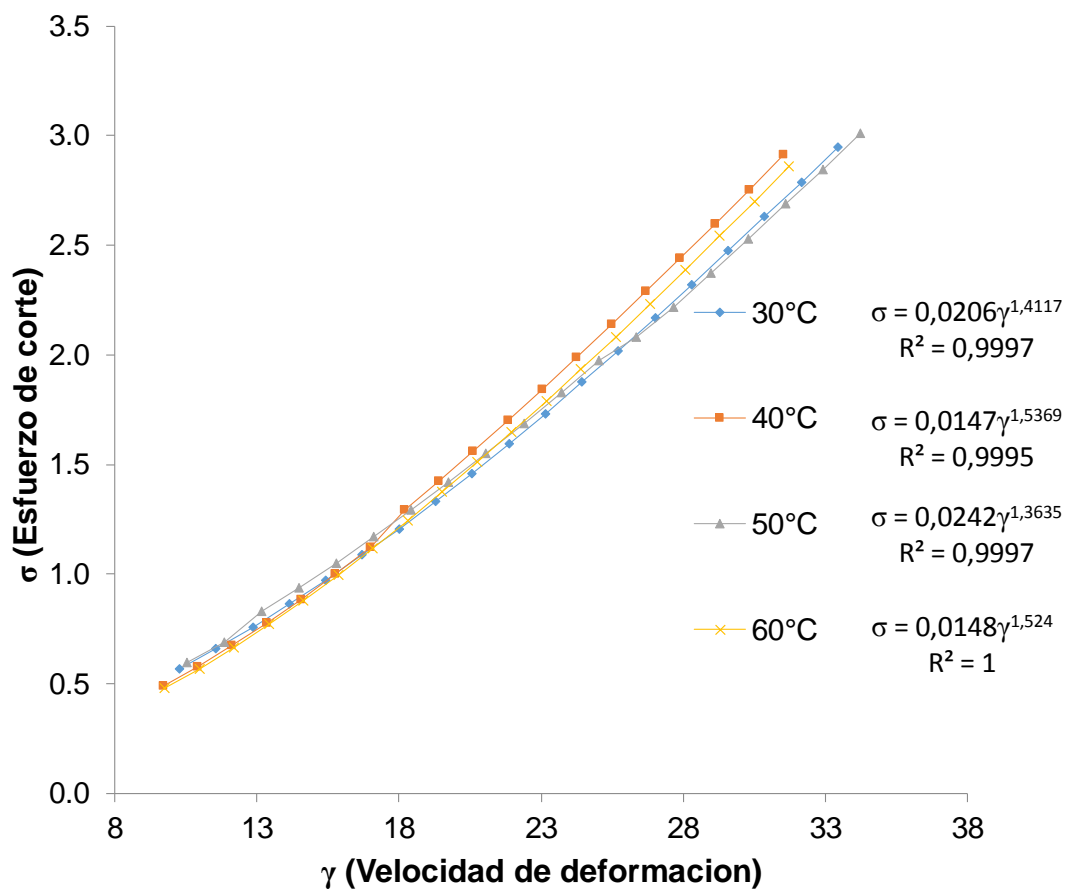


**Figura 15.** Velocidade de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día doce de la evaluación

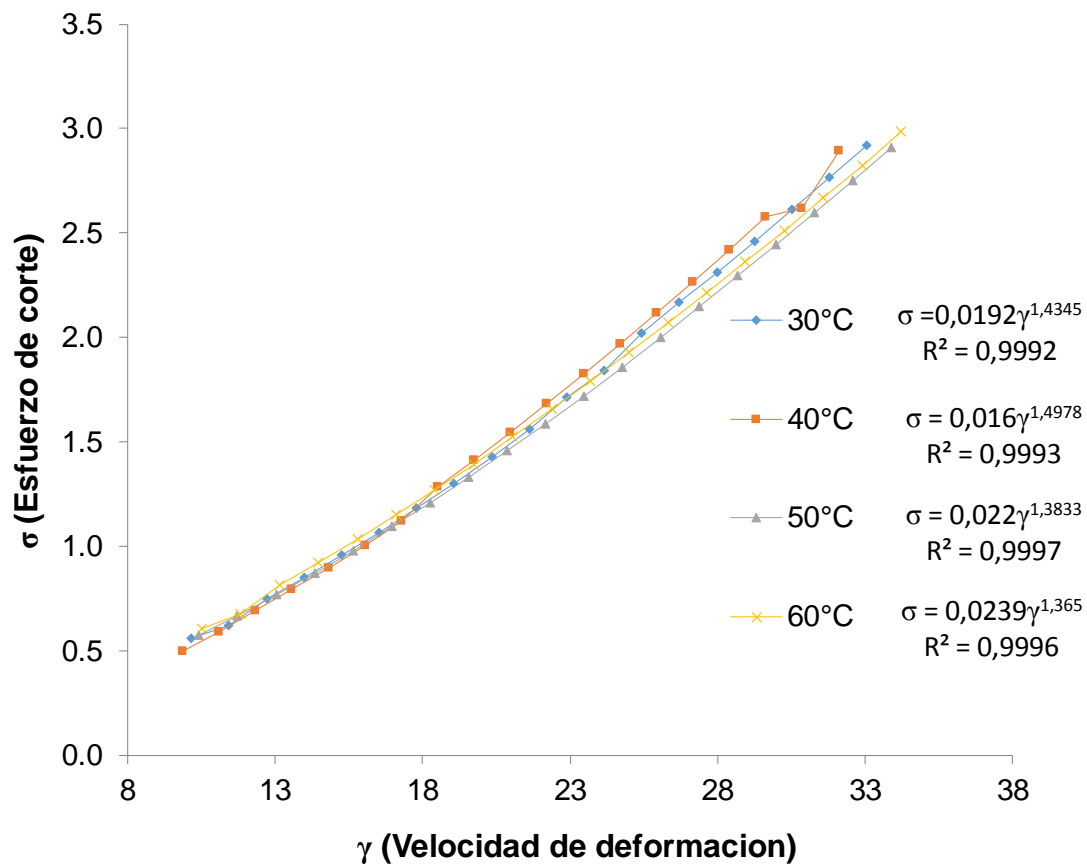




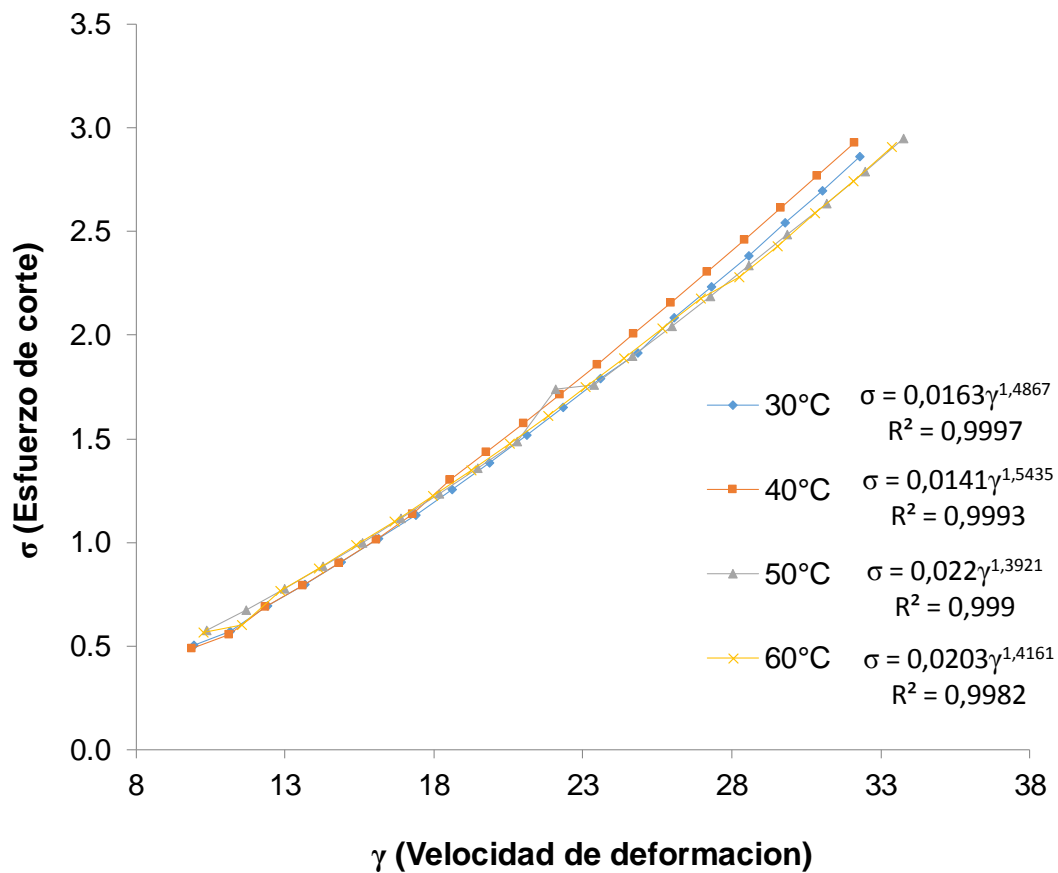
**Figura 16.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día dieciséis de la evaluación.



**Figura 17.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veinte de la evaluación.



**Figura 18.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veinticuatro de la evaluación.



**Figura 19.** Velocidad de corte y esfuerzo de corte a diferentes temperaturas en el día veintiocho de la evaluación.

