



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

---

“Influencia de las partículas (semillas y esferas  
de vidrio) en la energía de activación al flujo de  
pulpa de guayaba”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:  
MIRIAM JAZMÍN MARTÍNEZ LARA

ASESOR: Dra. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES

COASESOR: I.A. VERÓNICA ROMERO ARREOLA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## “ESCALONES”

Así como toda flor se marchita y toda juventud cede a la edad,  
así también florece cada etapa de la vida;  
florece toda sabiduría y cada virtud, a su tiempo,  
mas no les es dado durar eternamente.

El corazón, a cada llamada de la vida,  
debe estar atento al adiós y al recomienzo,  
para estar dispuesto a entregarse con valor y sin duelos,  
a nuevas y distintas ataduras.

En el fondo de cada comienzo hay un encanto  
que nos protege y nos ayuda a vivir.

Hemos de ir serenos y alegres espacio tras espacio,  
sin aferrarnos a ninguno, cual si fuera una patria;  
el espíritu universal no quiere encadenarnos:  
quiere elevarnos, desarrollarnos,  
escalón tras escalón.

Apenas nos acomodamos y nos acostumbramos  
a una morada y a un ambiente, cuando ya todo empieza a languidecer:  
sólo quien está preparado al viaje y a peregrinar  
podrá escapar a la parálisis que causa la costumbre.

Quizá la hora de la muerte todavía nos coloque  
frente a nuevos espacios que debemos andar:  
de esta manera, no tendrá fin para nosotros la llamada de la vida...

= Hermann Hesse =

Al Espíritu Universal que ha estado en cada momento de mi vida y hoy me permite  
avanzar un paso más en esta existencia.

Agradezco a mi asesora Virginia Delgado por su apoyo y su guía en esta investigación y a  
mi coasesora Verónica Romero quién me apoyó para la elaboración del presente trabajo.

A mi familia quienes estuvieron presentes en todo el proceso de mi carrera y me alentaron  
en cada momento.

A Javier por pasar esta etapa a mi lado y hacerla más agradable.

# ÍNDICE

	Página
Índice de Figuras	II
Índice de Cuadros	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	V
I. ANTECEDENTES	1
1.1. Sistemas dispersos	1
1.2. Suspensiones	2
1.3. Reología	4
1.3.1. Factores que afectan a la reología de las suspensiones	10
1.4. Relación de la temperatura con la viscosidad	15
II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
2.1 Objetivos	19
2.2. Desarrollo experimental	20
2.2.1. Materiales	20
2.2.2. Métodos	20
2.2.2.1. Obtención de la pulpa de guayaba y extracción de las semillas	20
2.2.2.2. Preparación de la pulpa de guayaba con y sin semillas	22
2.2.2.3. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y sólidos totales de la pulpa de guayaba	22
2.2.2.4. Estudio reológico en cizalla rotacional de la pulpa de guayaba con semillas y esferas de vidrio al 10 y 20%	25
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1. Propiedades físicas, fisicoquímicas y sólidos totales de la pulpa de guayaba	29
3.2. Comportamiento al flujo de pulpa de guayaba sin semillas	31
3.3. Comportamiento al flujo de pulpa de guayaba con semillas y esferas (10% y 20%)	41
3.4. Relación de la viscosidad con la temperatura	50
CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Uniformidad del esfuerzo normal	4
Figura 1.2	Esfuerzos en un material	5
Figura 1.3	Deformación de cizalla	6
Figura 1.4	Efecto de la cizalla en las moléculas de fluidos que son descritos por el modelo adelgazante	8
Figura 1.5	Viscosidad en función a los cambios de velocidad de cizalla	11
Figura 1.6	Formación de capas y cadenas en una suspensión en reposo y cizallada a altas velocidades de cizalla por partículas esféricas	13
Figura 1.7	Dependencia de la viscosidad de diferentes formas de partículas en agua a una velocidad de cizalla de $300 \text{ s}^{-1}$ ; (○) esferas; (■) granos; (□) placas y (●) varillas	13
Figura 1.8	Destrucción de la estructura de una suspensión para alcanzar el flujo	14
Figura 1.9	Energía de activación al flujo	17
Figura 2.1	Diagrama de proceso para la elaboración de pulpa de guaya y la separación de las semillas	21
Figura 3.1	Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba sin semillas a $25^\circ\text{C}$ a) Método 1 y b) Método 2	31
Figura 3.2	Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de $500 \text{ s}^{-1}$ para la pulpa de guayaba sin semillas a diferentes temperaturas para el método 1 (m1) y método 2 (m2)	33
Figura 3.3	Esfuerzo de cizalla en función a la velocidad de cizalla para la pulpa sin semillas a diferentes temperaturas a) Método 1 y b) Método 2.	36
Figura 3.4	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a diferentes temperaturas a) Método 1 y b) Método 2	37
Figura 3.5	Viscosidad en función del tiempo de cizallamiento a una velocidad de cizalla de $500 \text{ s}^{-1}$ para la pulpa de guayaba con 10% de semillas a diferentes temperaturas	42
Figura 3.6	Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba con diferente concentración de semillas y esferas a diferentes temperaturas. a) $5^\circ\text{C}$ , b) $35^\circ\text{C}$ y c) $65^\circ\text{C}$	45
Figura 3.7	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las temperaturas de a) 5, b) 35 y c) $65^\circ\text{C}$ .	48
Figura 3.8	Logaritmo natural de la viscosidad a $100 \text{ s}^{-1}$ en función al inverso de la temperatura para la pulpa de guayaba a las diferentes concentraciones de semillas y esferas.	50

## ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.1	Diferencias en el tamaño de partícula de los diversos tipos de dispersiones	1
Cuadro 1.2	Diferencias entre los componentes de las dispersiones	2
Cuadro 1.3	Ecuaciones matemáticas para diferentes modelos de fluidos	7
Cuadro 3.1	Propiedades fisicoquímicas y sólidos totales de las diferentes pulpas de guayaba	29
Cuadro 3.2	Acidez e índice de madurez de la pulpa de guayaba natural	30
Cuadro 3.3	Viscosidad a velocidad de cizalla de $500 \text{ s}^{-1}$ , diferentes tiempos de cizallamiento y temperaturas, de la pulpa de guayaba para ambos métodos.	32
Cuadro 3.4	Valores de diferencias mínimas significativas (DMS) de la viscosidad a diferentes temperaturas	34
Cuadro 3.5	Parámetros reológicos del modelo Ostwald-de Waele a diferentes temperaturas de la pulpa de guayaba sin semillas para ambos métodos	38
Cuadro 3.6	Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas	39
Cuadro 3.7	Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas	39
Cuadro 3.8	Viscosidad evaluada a diferentes velocidades de cizalla y temperaturas de la pulpa de guayaba sin semillas	40
Cuadro 3.9	Viscosidad obtenida a una velocidad de cizalla constante de $500 \text{ s}^{-1}$ al primer y último tiempo de cizalla aplicada en la pulpa de guayaba con 10 y 20% de semillas y esferas de vidrio	43
Cuadro 3.10	Parámetros reológicos al equilibrio, del modelo Ostwald-de Waele para cada temperatura de la pulpa de guayaba con 10 y 20% de semillas y esferas de vidrio	47
Cuadro 3.11	Viscosidad de la pulpa de guayaba sin y con semilla o esferas de vidrio al 10 y 20% a una velocidad de cizalla de $100 \text{ s}^{-1}$	49
Cuadro 3.12	Parámetros del modelo de Arrhenius	51
Cuadro 3.13	Parámetros del modelo de Arrhenius en la pulpa de guayaba con y sin semillas o esferas de vidrio en las condiciones de no equilibrio y equilibrio.	52

## RESUMEN

Se evaluó la influencia en la energía de activación al flujo de las semillas de guayaba y esferas de vidrio en la pulpa de guayaba. Para ello se utilizó pulpa de guayaba sin semilla y con 10% y 20% de semillas o esferas de vidrio, obteniendo curvas de flujo a diferentes temperaturas (5, 15, 25, 35, 45, 55, y 65 °C), mediante dos métodos de cizallamiento. El primero consistió de tres segmentos: curva de cizalla a velocidad de cizalla constante ( $500 \text{ s}^{-1}$ ), curva de descenso y curva de ascenso de velocidad de cizallamiento ( $0.1 - 500 \text{ s}^{-1}$ ). El segundo método fue realizado en cuatro segmentos: curva de flujo ascenso de velocidad de cizalla ( $0.1 - 500 \text{ s}^{-1}$ ), curva de cizallamiento a velocidad constante ( $500 \text{ s}^{-1}$ ), dos curvas de ascenso y descenso de velocidad de cizalla ( $0.1 - 500 \text{ s}^{-1}$ ). Se utilizó un reómetro de cilindros concéntricos marca Haake modelo RT20 con una geometría Z20.

Las curvas de flujo de la pulpa de guayaba a todas las concentraciones de semillas y esferas de vidrio, se ajustaron a un modelo de Ostwald-de Waele, en donde se observó que el índice de consistencia disminuye con respecto al aumento de la temperatura, mientras que el índice de comportamiento al flujo no presentó una tendencia definida.

Se calculó la energía de activación a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y  $500 \text{ s}^{-1}$ ) en condiciones de equilibrio (curvas de flujo independientes del tiempo de cizallamiento) y se encontró que la energía de activación al flujo, aumenta con la concentración de semillas, tanto a altas y a bajas velocidades de cizalla, mientras que al utilizar esferas de vidrio, no se obtuvo una tendencia definida a altas velocidades de cizalla, mientras que a bajas velocidades de cizalla, se encontró también que aumenta conforme aumenta la concentración de esferas de vidrio.

## INTRODUCCIÓN

Las pulpas frutales son sistemas bifásicos, donde la fase continua está formada por una solución, la cual presenta agua como solvente, y polisacáridos, proteínas, compuestos aromáticos, ácidos orgánicos como soluto; y la fase dispersa está conformada por el tejido desintegrado, que contiene fibra celulósica, pectinas, semillas y en algunos casos partículas lipoides que contienen carotenoides y aceites esenciales (Garza, 1999).

Debido a la complejidad en su estructura, las pulpas pueden presentar comportamientos de flujo newtonianos o no newtonianos, dependiendo de las interacciones físicas, químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de las fases (Pérez y Garcell, 2011), las características no newtonianas se deben principalmente a la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de partículas, el pH, la temperatura y la composición química (Quintáns, 2011).

En la industria de alimentos existen una amplia gama de productos derivados de la fruta, con diferente composición, concentración, tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas en una fase acuosa (Pelegri y Gasparetto, 2002), estos factores influyen de forma importante en el proceso de elaboración, diseño y selección de equipos (bombeo, mezclado, intercambiadores de calor), almacenamiento, transporte, venta y consumo de pulpas de fruta, por lo que se han realizado estudios del efecto de tamaño y distribución de la partícula en las propiedades reológicas de pulpas de jaborcoba (fruta originaria de Brasil) (Sato y Cunha, 2009; Lozano e Ibarz, 1994) en pulpas de melocotón y ciruela. Sin embargo, los estudios que relacionan las propiedades reológicas con el tamaño de partícula son a menudo contradictorias, ya que para concentrados de tomate, se determinaron viscosidades mayores (Tanglerpaibul y Rao, 1987; Den Ouden y Van Vliet, 1997) para pequeños tamaños de partículas, lo cual se explica debido a la interacción de una distancia corta entre las partículas pequeñas, en cambio, López y col. (2010) demostraron cómo un tamaño de partícula pequeño, después de una homogeneización, puede conducir a la reducción de la viscosidad debido a que disminuye el volumen ocupado por los tejidos, por lo que han llegado a la conclusión de que es importante considerar otros parámetros como la

dureza de las partículas y la estructura de la célula, para explicar los cambios en los parámetros reológicos.

Otro aspecto importante a considerar en el comportamiento reológico de pulpas frutales es la temperatura, ya que la viscosidad se ve modificada por la temperatura a la que son sometidos dichos productos. El efecto de la temperatura puede relacionarse mediante el cálculo de la energía de activación al flujo (Garza, 1999). La energía de activación relaciona el trabajo necesario para formar un espacio en el líquido a través de los cuáles se mueven las moléculas, y de esta forma se permite el movimiento o flujo; las partículas juegan un papel importante en ella, ya que al existir determinada concentración de partículas sólidas en un medio líquido se conduce a una alteración hidrodinámica en el campo de flujo, lo cual incrementa la energía disipada, la viscosidad y el trabajo necesario para poder moverlo (Zhou y col., 2001).

En estudios como los realizados en productos de tomate (Bayod y Tornberg, 2011; Sharma y col., 1996), jugo de mango (Dak y col., 2007) y guayaba (Zainal y col., 2000) se analizó el efecto de la concentración de sólidos sobre la energía de activación, pero no se ha investigado el efecto de la presencia de partículas rígidas, como lo son las provenientes de la semilla de guayaba y esferas de vidrio (debido a que presentan una forma definida), por lo que en este proyecto se considera importante profundizar en la influencia del tipo de partículas en la energía de activación al flujo, utilizando para ello pulpa de guayaba, la cual presenta claras diferencias en el tipo de sus partículas entre las semillas y las partículas que forman la pulpa, para así poder relacionarla con la variación de la viscosidad.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

### 1.1. Sistemas dispersos

Muchos alimentos aparecen en forma de dispersión de una fase en otra o bien pueden formar/romper una dispersión durante el procesamiento, lo que a menudo cambia profundamente sus propiedades reológicas. Todos los componentes de los alimentos se encuentran en uno de los siguientes estados de dispersión: a) dispersión molecular o solución verdadera, b) dispersión coloidal y c) dispersión gruesa. La diferencia entre ellos se basa fundamentalmente en el tamaño de partícula como se presenta en el Cuadro 1.1 (Badui, 1990; Genovese y col., 2007).

Cuadro 1.1. Diferencias en el tamaño de partícula de los diversos tipos de dispersiones (Badui, 1990; Genovese y col., 2007).

Propiedad	Tamaño de partícula	Homogeneidad	Acción a la gravedad	Filtrabilidad
Solución verdadera	< 1 nm	Homogénea	No sedimenta	No filtrable
Solución molecular/coloidal (polímeros)	1 nm	Límite	Puede sedimentar	Difícilmente filtrable
Solución microscópica/coloidal	1 nm-1 $\mu$ m			
Solución microscópica/no coloidal	10 $\mu$ m-100 $\mu$ m			
Solución macroscópica/no coloidal	> 100 $\mu$ m			
Suspensión o dispersión gruesa	> 100 nm	Heterogénea	Sedimenta	Filtrable

En general, los sistemas dispersos se caracterizan por estar integrados por dos o más fases: una discontinua (fase dispersa o externa) y otra, llamada continua (fase dispersante o interna). Las partículas de mayor tamaño producen la fase dispersa y se encuentran distribuidas entre las moléculas de bajo peso molecular de la fase dispersante y son estables al menos en el corto plazo por el pequeño tamaño de sus

partículas, lo que causa que el tiempo de separación por decantación o flotación sea largo (Cubero y col., 2002).

Las sustancias que forman una dispersión pueden ser de orígenes muy diversos y según el estado de las fases que forman la dispersión (sólido, líquido, gaseoso), se crean diferentes tipos de sistemas dispersos cuyas características se muestran en el Cuadro 1.2 (Cubero y col., 2002).

Cuadro 1.2. Diferencias entre los componentes de las dispersiones (Cubero y col., 2002).

TIPO	FASE DISPERSA	FASE CONTINUA	EJEMPLO
Emulsión	Líquida	Líquida	Mayonesa, margarina
Espuma	Gaseosa	Líquida	Nata, espuma, cerveza
Aerosol	Líquida o gaseosa	Gaseosa	Atomizadores
Suspensión	Sólida	Líquida	Paté, jugos, néctares y concentrados de fruta, leche con cacao

## 1.2 Suspensiones

Una suspensión se define como un sistema heterogéneo constituido por una fase sólida dispersa, finamente dividida en el seno de una fase líquida denominada fase dispersante externa o continua, donde es posible identificar cada componente individual de la dispersión (Vila, 1997).

Existen muchos alimentos que se pueden considerar como suspensiones, por ejemplo: sopas tipo crema, salsas, néctares de frutas y pulpas de fruta. Los jugos de frutas pueden ser considerados como soluciones acuosas de solutos con componentes no solubles en suspensión. Los jugos incluyen en sus componentes solubles: azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa), ácidos orgánicos (ácido cítrico, ácido málico y ácido tartárico) y sales solubles. Otros componentes como pectina, hemicelulosa y celulosa se encuentran en menor proporción (Betalleluz y Velezmoro, 2001). Las suspensiones de las pulpas frutales están formadas por una fase continua de una solución de agua (disolvente) con polisacáridos, proteínas, compuestos aromáticos, ácidos orgánicos y la

fase dispersa es el tejido desintegrado, que contiene fibra celulósica, pectinas, semillas y en algunos casos partículas hidrófobas (carotenoides y aceites esenciales), formando un sistema heterogéneo que puede sedimentar fácilmente y se pueden separar algunos de sus componentes mediante la filtración (Garza, 1999).

Un componente importante de la suspensión es una partícula, que de acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española, se define como parte pequeña de materia. Jonasz y Fournier (2007) propusieron una definición del tamaño y forma de la partícula como una matriz tridimensional de espacio ocupada por la partícula. Así mismo, propusieron cuatro elementos descriptores del tamaño de las partículas que consiste en el número del volumen tridimensional del elemento y de su distribución espacial. Los parámetros como la forma de las partículas, el tamaño, su distribución y la deformabilidad de las mismas, así como la polaridad, podrían afectar su estructura y el comportamiento al flujo de las dispersiones (Tsai y Zammouri, 1988).

De acuerdo al tamaño de la fase dispersa que integran a las suspensiones de pulpas frutales pueden ser clasificados en cuatro categorías (Martins y col., 2010):

- ◆ Partículas gruesas: Se consideran gruesas a las partículas dispersas (> 1 mm) como fibras, partículas de las pulpas y células duras, que sedimentan fácilmente.
- ◆ Partículas dispersas: Se consideran finas a las partículas dispersas (1-100  $\mu\text{m}$ ) como fragmentos de pulpas, agregados de células, fragmentos de paredes celulares y partículas de almidón que sedimentan lentamente durante el almacenamiento debido al complejo proteína-carbohidrato que da una carga positiva, rodeada por una carga negativa de recubrimientos de pectina.
- ◆ Sustancias coloidales (0.1-0.001  $\mu\text{m}$ ) como pectinas, hemicelulosa, proteínas y almidón, en los cuales la sedimentación es causada únicamente por actividad enzimática.
- ◆ Sustancias emulsificantes (< 0.001 $\mu\text{m}$ ) como aceites, carotenoides y aceites esenciales, que no sedimentan bajo condiciones normales.

### 1.3. Reología

En la industria alimentaria, para conservar las frutas o para aumentar su valor nominal, los frutos son sometidos a diversos procesos mediante los cuales se alarga su vida de anaquel y, en la mayoría de los casos, el transporte de las pulpas y demás ingredientes que se adicionan a las formulaciones se hace mediante tuberías por lo que es necesaria la descripción del fluido para el diseño del sistemas de bombeo, tuberías e intercambiadores de calor. Por ello es necesario conocer el comportamiento reológico de las pulpas frutales.

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales bajo la influencia de fuerzas mecánicas (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003), y analiza la relación existente entre las variables esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ), deformación de cizalla ( $\gamma$ ) y velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ). A continuación se definen estas variables.

El esfuerzo es definido como la fuerza ( $F$ ) aplicada por unidad de área ( $A$ ), puede ser normal o tangencial. Para definir el esfuerzo normal se considera un sólido con forma cilíndrica (Figura 1.1). En cualquier área perpendicular a la fuerza, se muestra un esfuerzo interno normal en la barra, que es uniforme en la sección transversal (es decir, perpendicular al largo de la pieza) y que tiene un valor equivalente a  $\sigma = F/A$ . Por lo tanto, se debe considerar también el sentido de la fuerza aplicada, si la fuerza hace que el cilindro se estire o tense, como en el caso de la Figura 1.1, se le llama esfuerzo de tensión (o tracción) y si se invierte el sentido de la fuerza haciendo que el cilindro se comprima, se le llama esfuerzo de compresión (García, 2004).

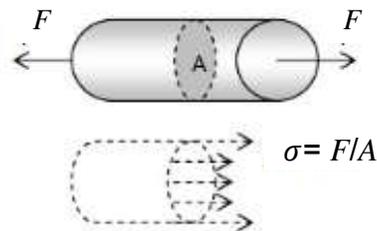


Figura 1.1. Uniformidad del esfuerzo normal (García, 2004).

El esfuerzo tangencial o de cizalla es la intensidad de fuerza o fuerza por área unitaria, actuando tangencialmente sobre el cuerpo (Hibbeler, 2006).

Considerando un cuerpo, como el mostrado en la Figura 1.2 se puede observar que tres esfuerzos pueden ser aplicados en cada lado del cuerpo, uno por cada dirección. Entonces, se tendrán nueve componentes de esfuerzo, y cada uno será nombrado con dos subíndices. El primer subíndice se refiere a la sección donde es aplicado el esfuerzo y el segundo a la dirección en que se ejerce.

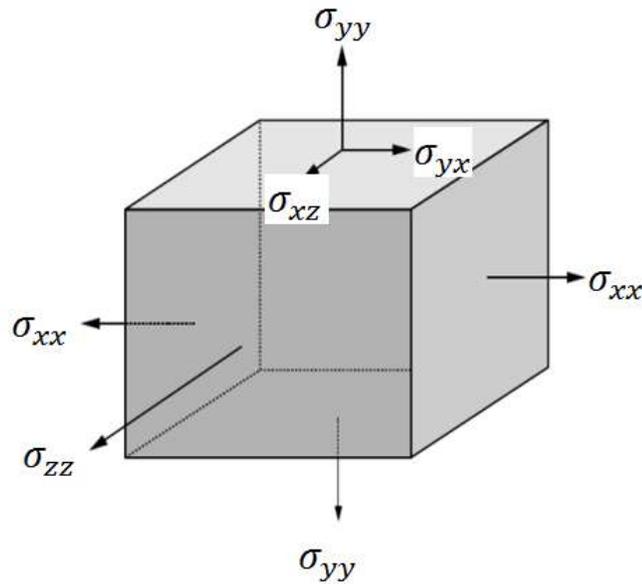


Figura 1.2. Esfuerzos en un material (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

Así el esfuerzo aplicado sobre un cuerpo puede especificarse mediante un tensor que representa las componentes de la fuerza que actúa sobre el cubo, respecto a la unidad de área sobre la que se aplica dicha fuerza (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Si el esfuerzo se aplica de forma tangencial a un material rectangular, provocará una deformación como se muestra en la Figura 1.3.

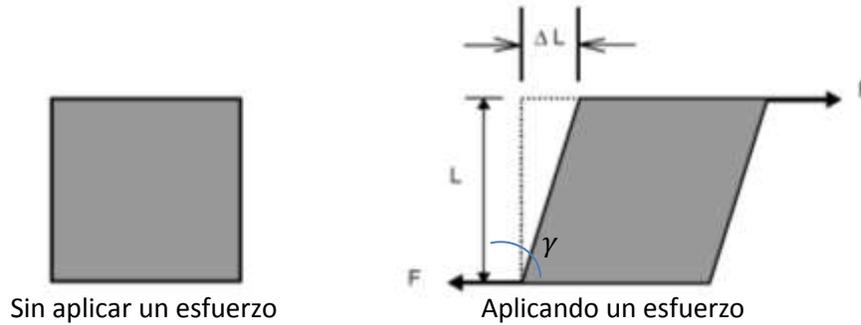


Figura 1.3. Deformación de cizalla (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

Donde el lado inferior se mantiene fijo y el ángulo formado de esta deformación, es el ángulo  $\gamma$  que se calcula según la ecuación:

$$\tan \gamma = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

En el caso de pequeñas deformaciones, el ángulo  $\gamma$  en radianes coincide con su tangente:  $\tan \gamma = \gamma$ , llamada deformación de cizalla, la cual se aplica en estas componentes  $\gamma_{yz}, \gamma_{zy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xy}$  (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003). Cuando un elemento cúbico es sometido a un esfuerzo, se puede provocar la deformación en una o más de sus dimensiones, es decir que al aplicar una fuerza se cambia de forma y por lo tanto de su volumen, por ello la deformación se puede describirse mediante un tensor de deformación (Steffe, 1996; Garriga, 2002).

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} \gamma_{xx} & \gamma_{yx} & \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} & \gamma_{yy} & \gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \gamma_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

La velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) define la variación de la deformación de cizalla con respecto al tiempo y se mide en unidades de 1/s.

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{d\gamma_{ij}}{dt} \quad (4)$$

La expresión matemática dada como la relación entre el esfuerzo de cizalla aplicado para mover una capa del fluido y la velocidad de cizalla es la viscosidad y mide la facilidad que tiene una determinada sustancia para fluir ante la aplicación de un

esfuerzo de cizalla en unas determinadas condiciones de temperatura y agitación del fluido, se mide en  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$  o  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ . La relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla en cualquier punto, da como resultado una clasificación reológica (García, 2004), en términos generales los fluidos se clasifican en fluidos con comportamiento newtoniano y no newtoniano.

La diferencia entre el comportamiento de un fluido newtoniano y no newtoniano, depende de si es posible o no describirlo por la ley de Newton de la viscosidad, en donde existe una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla. Lo cual significa que la viscosidad es constante e independiente de la velocidad de cizalla y puede depender de la temperatura en la que se le encuentre (Rodríguez, 2009). Muchos materiales alimenticios como leche, jugo de manzana, vino y cerveza, tienen un comportamiento newtoniano (Ramírez-Navas, 2006).

Los fluidos no newtonianos son aquellos cuya viscosidad varía con la velocidad de cizalla que se le aplica, es decir, la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla no es lineal (Amaya y Suárez, 2012). Asimismo, el comportamiento de estos fluidos depende también del tiempo en que el esfuerzo de cizalla actúe sobre él, clasificándolos en fluidos independientes y dependientes del tiempo de cizallamiento (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

Ante cualquier velocidad de cizalla dada, la viscosidad de un fluido no varía en función del tiempo de observación. En estos fluidos se incluyen a los modelos de Ley de la potencia, plástico de Bingham y Herschel-Bulkley. En el Cuadro 1.3 se presenta las ecuaciones matemáticas que describe a estos modelos.

Cuadro 1.3. Ecuaciones matemáticas para diferentes modelos de fluidos (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

	Ecuación matemática	Parámetros
Ley de la potencia	$\sigma = K\dot{\gamma}^n$	$K$ es el índice de consistencia ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )
Plástico de Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta\dot{\gamma}$	$n$ es el índice de comportamiento al flujo (adimensional) $\eta$ es la viscosidad ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n$	$\sigma_0$ es el esfuerzo inicial (Pa)

Los fluidos que siguen un comportamiento de la Ley de la potencia pueden ser adelgazantes o espesantes a la cizalla. Los fluidos adelgazante a la cizalla se caracterizan por una disminución en su viscosidad con el incremento de la velocidad de cizalla en determinados intervalos, esto puede ser debido al cambio en la estructura del fluido como el cambio de orientación, extensión, deformación o desgregación de las moléculas, como se observa en la Figura 1.4 (Ramírez-Navas, 2006):

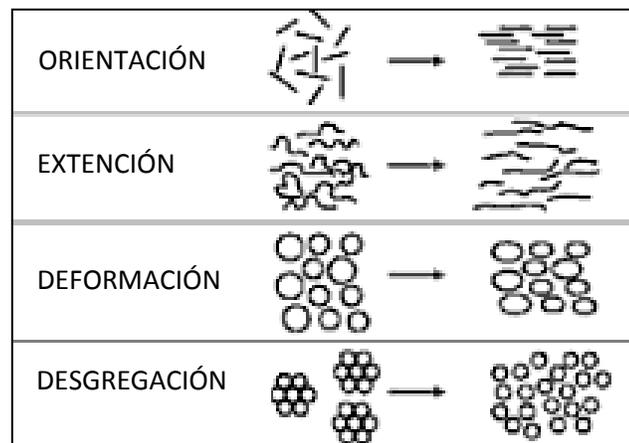


Figura 1.4. Efecto de la cizalla en las moléculas de fluidos que son descritos por el modelo adelgazante (Ramírez-Navas, 2006).

Los fluidos espesantes a la cizalla son suspensiones en las que la viscosidad aumenta conforme se incrementa la velocidad de cizalla. Este aumento de viscosidad se debe a que en la fase dispersa del fluido se produce un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio. Si a continuación se aplica una velocidad de cizalla, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan, y al seguir aumentando la velocidad de cizalla aparece una turbulencia, por lo que es más difícil el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo de cizalla o aumento en la viscosidad (Boatella y col., 2004).

Los modelos plástico de Bingham y Herschel-Bulkley se comportan como sólidos hasta que sobrepasa un esfuerzo de cizalla mínimo (esfuerzo inicial) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido (Géosta y López, 2003), por las fuerzas de atracción que

presentan las partículas en estado de reposo, las cuales se deben vencer para dar inicio al flujo (Barnes, 2000). En los fluidos plásticos de Bingham existe proporcionalidad entre el esfuerzo cizalla y la velocidad de cizalla, a partir de su esfuerzo inicial. Si no presentan la proporcionalidad los fluidos se definen por el modelo de Herschel-Bulkley (Boatella y col., 2004).

En los fluidos dependientes del tiempo, al aumentar el tiempo de flujo bajo condiciones de cizallamiento constante, pueden desarrollar un aumento o disminución de la viscosidad. Si la viscosidad disminuye con respecto al tiempo es denominado tixotrópico, mientras que si la viscosidad aumenta con respecto al tiempo se conoce como antitixotrópico (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

Un sistema tixotrópico puede visualizarse como un fluido en el que los enlaces químicos se rompen o en el que las partículas se alinean al aumentar la velocidad de cizalla, disminuyendo la viscosidad. Al cesar la velocidad de cizalla, la viscosidad se recupera lentamente gracias a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. El material necesita de un tiempo medible para adaptar su estructura a la nueva estructura de equilibrio, superior al tiempo experimental, se dice que presenta tixotropía positiva (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2003).

La antitixotropía es el aumento de la viscosidad con el tiempo cuando se aplica una cizalla constante, además presentan una histéresis inversa a los fluidos tixotrópicos. Debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa la velocidad de cizalla, se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad (Moreno, 2005).

Algunos estudios reológicos se han realizado en pulpas y jugos de frutas, donde Sánchez y Sánchez-Jimeno (2006) en pulpa de guayaba mostraron un comportamiento al flujo no newtoniano, que se ajustó a la Ley de la potencia, presentando un comportamiento fluidificante, donde el índice de consistencia disminuyó con el efecto de la temperatura. En jugo de piña Shamsudin y col. (2007), determinaron un comportamiento newtoniano en el intervalo de temperatura de 5 a 65°C. Martins y col.

(2010), encontraron un comportamiento no newtoniano tipo fluidificante a la cizalla en la pulpa de cereza, en un intervalo de 15 a 40°C.

### **1.3.1 Factores que afectan a la reología de las suspensiones**

El comportamiento reológico de los sistemas multifásicos está determinado, generalmente, por el comportamiento de la fase continua y por las fuerzas entre las partículas. Para cada material existen fuerzas de interacción entre los diferentes componentes, enlaces químicos, interacciones físicas tales como fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, interacciones sólido-líquido, entre otras, las cuales dominan el comportamiento estructural bajo la acción de una deformación débil. A medida que la deformación se incrementa y se inicia el movimiento, el esfuerzo o las fuerzas de elongación pueden superar a las fuerzas estructurales. En este sentido, en los experimentos reológicos bajo cizalla rotacional se asume que a una determinada velocidad de cizalla el fluido eventualmente adquirirá un “equilibrio estructural”, ya que a medida que se incrementa la velocidad de cizalla, la viscosidad de la mayoría de los alimentos cambia rápidamente de acuerdo a un comportamiento newtoniano. Según Windhab (1995), los cambios en la estructura interna del producto son función del intervalo de la velocidad de cizalla (Figura 1.5).

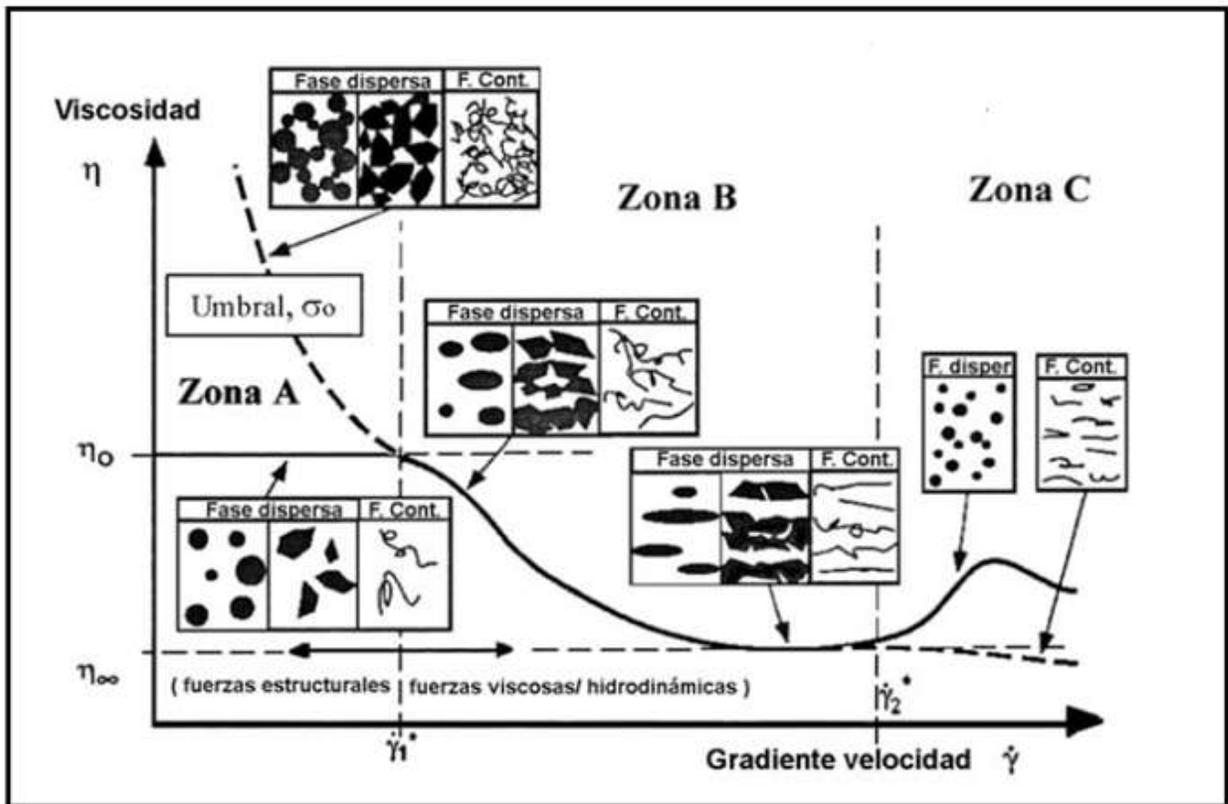


Figura 1.5. Viscosidad en función a los cambios de velocidad de cizalla, (Windhab, 1995).

Windhab (1995), describe que en la zona A, las fuerzas hidrodinámicas son despreciables y únicamente el movimiento Browniano que es el movimiento constante de las partículas que actúa contra las fuerzas estructurales. Para concentraciones bajas de los componentes estructurales, el que domina es el movimiento Browniano, que mantiene una estructura isotrópica con interacciones insignificantes entre las partículas o las macromoléculas. En este caso, la viscosidad cero  $\eta_0$ , es independiente de la velocidad de cizalla y se presenta una caída rápida a bajas velocidades de cizalla.

En la zona B, las fuerzas hidrodinámicas son del mismo orden de magnitud que las fuerzas estructurales, lo cual induce a nuevas estructuras de acuerdo con el tipo, dirección y tiempo de aplicación de las fuerzas de movimiento. En el caso de que este tiempo sea suficiente largo se alcanzará una “estructura de equilibrio”. En la mayoría de alimentos multifásicos, la viscosidad se reduce con el incremento de la velocidad de cizalla, lo que corresponde a un comportamiento adelgazante a la cizalla.

En la zona C se presentan inestabilidades del flujo, interacciones partícula-partícula, especialmente si hay partículas gruesas o cambios en la estructura debidos al rompimiento de burbujas que provocan el incremento de la dispersión.

Las suspensiones de partículas en líquidos son muy habituales en la naturaleza y en la industria, por lo que la capacidad para controlar los procesos de flujo industriales con precisión y predecir los fenómenos naturales, depende fundamentalmente de los conocimientos que se tengan de la reología de las suspensiones. Por lo cual, a continuación se describen los diferentes factores que la afectan.

### **Concentración de las partículas**

Cuando las suspensiones son concentradas, las líneas de flujo se modifican notablemente y unas partículas interaccionan con otras, ya que las partículas tienden a retirarse del camino de otra para poder fluir, aumentando de esta manera la viscosidad de la suspensión. El efecto de los sólidos puede ser tan drástico que puede incluso llegar a aparecer un esfuerzo inicial, cuyo valor aumenta exponencialmente con el aumento de la concentración de sólidos.

### **Forma de la partícula**

Cuando las partículas son esféricas hay una energía de disipación extra y por consecuencia, un mayor incremento de la viscosidad (Genovese y col., 2007). Si la dispersión es cizallada a bajas velocidades de cizalla, entonces se da un movimiento cooperativo que permite que estas partículas se muevan en la dirección al flujo, manteniendo la distribución aleatoria por lo que la viscosidad es alta, mientras que si se incrementa la velocidad de cizalla, las partículas pueden comenzar a acomodarse en forma de cadenas y capas, facilitando su movimiento, como se observa en la Figura 1.6.

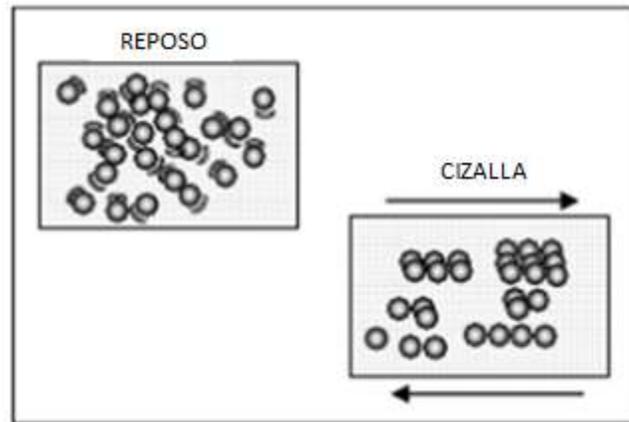


Figura 1.6. Formación de capas y cadenas en una suspensión en reposo y cizallada a altas velocidades de cizalla para partículas esféricas (Genovese y col., 2007).

La asimetría de las partículas tiene un fuerte efecto en la relación concentración/viscosidad. Se ha demostrado que cualquier desviación de partículas esféricas significa un aumento en la viscosidad de la misma fase. Así mismo las partículas con forma de varillas tienen un efecto mayor que los discos en el aumento de la viscosidad. La Figura 1.7 ilustra este punto, ya que la viscosidad aumenta según varía la forma de esferas, granos, placas y finalmente, varillas (Barnes y col., 1989).

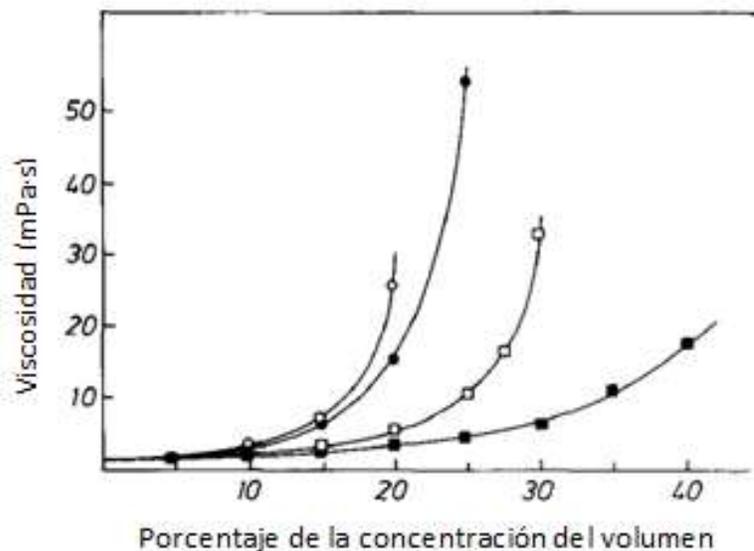


Fig. 1.7. Dependencia de la viscosidad de diferentes formas de partículas en agua a una velocidad de cizalla de  $300 \text{ s}^{-1}$ ; (○) esferas; (■) granos; (◻) placas y (●) varillas; (Barnes y col., 1989).

## Dureza de la partícula

Las partículas pueden tener naturaleza rígida o deformable. La alteración hidrodinámica en el campo de flujo inducido por partículas sólidas en medios líquidos conduce a un incremento de la energía disipada y por tanto un incremento en la viscosidad (Zhou y col., 2001). Mientras que a altas concentraciones, las partículas deformables pueden incrementar la fracción del volumen ocupado por la partícula y reducir la viscosidad, ya que se pueden acomodar entre ellas en reposo y apretarse entre sí al flujo, como por ejemplo en las suspensiones de almidón (Genovese y col., 2007).

## Tamaño de la partícula

El efecto del tamaño de partícula de las dispersiones involucra el arreglo espacial de las partículas, cuando la dispersión está en reposo, las partículas están dispersas al azar en la fase continua.

Según Barnes (2000), las partículas con un tamaño pequeño tienden a estar sujetas a fuertes fuerzas de atracción debido a una elevada superficie y una pequeña distancia entre partículas, por lo que tienen la capacidad de formar estructuras en gran parte debido a las fuerzas brownianas, pudiendo causar un esfuerzo inicial al aplicar una velocidad de cizalla, ya que se tiene que lograr desmoronar la estructura formada entre ellas para que de esta manera aparezca la zona adelgazante (Figura 1.8).

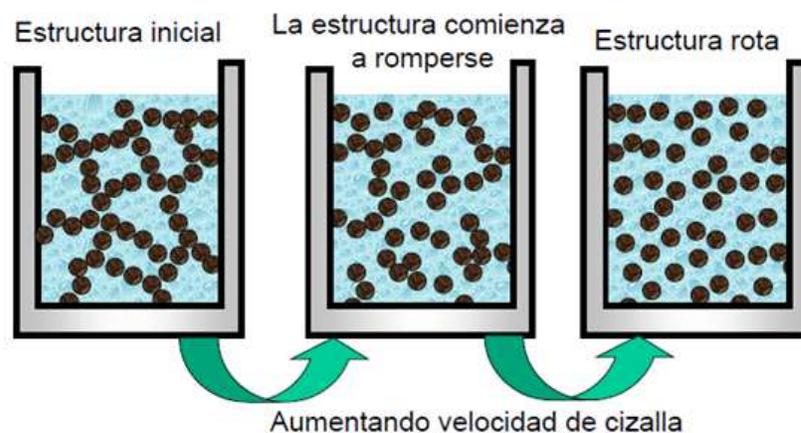


Figura 1.8. Destrucción de la estructura de una suspensión para alcanzar el flujo (Barnes, 2000).

De este modo, los mayores valores de viscosidad se obtienen con el menor tamaño de partícula, dado que el número de interacciones aumenta en la medida que disminuye el tamaño de partícula para una misma concentración. Así mismo, el menor tamaño de partícula incrementa la tixotropía, la viscosidad, la pseudoplasticidad y el esfuerzo inicial, mientras que para partículas con un tamaño más grande, se puede presentar la ruptura de la estructura de la red interna durante el cizallamiento, lo cual se refleja un deterioro abrupto de los parámetros reológicos al cizallar la suspensión (Sato y Cunha, 2009).

#### **1.4. Relación de la temperatura con la viscosidad**

La temperatura cambia apreciablemente durante muchas operaciones del proceso, por ello es importante obtener valores apropiados de viscosidad dentro del intervalo de temperaturas existente durante el procesado del producto (Dak y col., 2007). La temperatura actúa en las moléculas de un líquido que presentan fuerzas de cohesión, la cual parece ser la causa más predominante de la viscosidad en líquidos. Ésta se entiende como las fuerzas internas que mantienen unidas las moléculas del fluido entre sí. Cuando aumenta la temperatura de un líquido, aumenta la energía cinética de sus moléculas y, por tanto, las fuerzas de cohesión disminuyen en magnitud. Esto hace que disminuya la viscosidad (Velázquez y Ordorica, 2012).

La influencia de la temperatura sobre la viscosidad para los alimentos líquidos puede describirse mediante una relación tipo Arrhenius (Ec. 5), la cual puede utilizarse para determinar la influencia de la temperatura sobre la viscosidad en un alimento líquido. De la Ec. 5 se obtiene los valores de las constantes, ***A*** que es el factor de frecuencia o pre exponencial y ***Ea*** que es la energía de activación; tomando medidas a más de tres temperaturas, es posible conocer con precisión el valor de viscosidad a otras temperaturas dentro del intervalo de operación establecido (Alvarado, 1993).

$$\eta = f(T) = A \exp \left[ \frac{E_a}{RT} \right] \quad (5)$$

La energía de activación al flujo expresa la barrera de energía que debe ser superada antes de que el proceso elemental de flujo pueda ocurrir. Refleja las asociaciones moleculares de un fluido, lo cual puede ser una herramienta en el estudio de la interacción de ingredientes en los fluidos de alimentos, así como los cambios que estos sufren por el efecto de la temperatura (Tung y Paulson, 1995).

La energía de activación está relacionada con el trabajo necesario para formar un espacio o hueco en el líquido a través de los cuáles se mueven las moléculas, y de esta forma queda permitido el que tenga lugar su movimiento relativo (Levitt, 1979).

En los líquidos de bajo peso molecular se encuentra que la dependencia de la viscosidad con la temperatura sigue una relación exponencial simple:

$$\eta = A e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

Donde ***E<sub>a</sub>*** es la energía de activación al flujo viscoso (kJ/gmol), ***A*** es una constante, ***R*** es la constante universal de los gases (8.3143 kJ/kg mol K), ***T*** es la temperatura (K) y ***η*** es la viscosidad a una velocidad de cizalla constante (Tung y Paulson, 1995).

La teoría de Eyring está basada en suponer al líquido como una estructura de retículo o red, que contiene algunos lugares sin ocupar o huecos. Estos huecos se mueven al azar a través del líquido al ser ocupado y creados de nuevo por partículas que saltan de un hueco al otro. Bajo el efecto de una tensión aplicada, la probabilidad de tales saltos es mayor a la dirección que reduce la tensión. Si cada salto se realiza sobrepasando una barrera de energía de altura ***E*** (Figura 1.9), se conduce entonces a la ecuación de Arrhenius (Ec. 6).

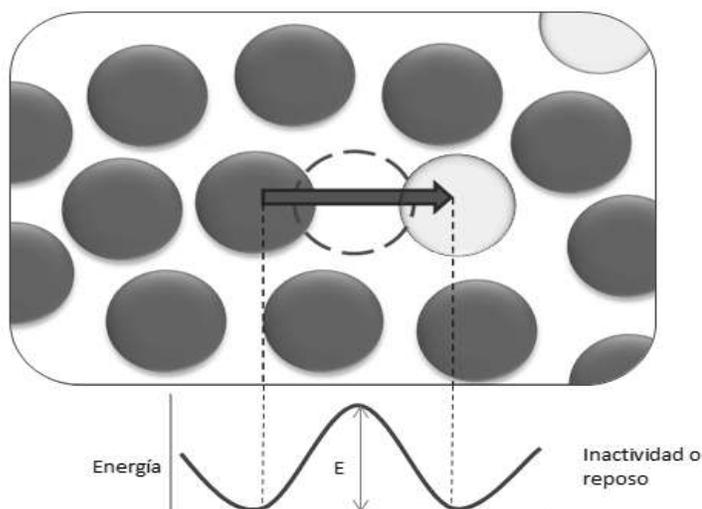


Figura 1.9. Energía de activación al flujo (Goodwin y Hughes, 2000).

La energía de activación  $E_a$  está relacionada con el calor latente de vaporización del líquido, ya que la separación de una molécula del medio externo de las moléculas próximas a ella, forma parte de ambos procesos. Dicha relación realmente se toma como prueba de que la partícula que se mueve de sitio en sitio es probablemente una molécula individual (Billmeyer, 2004).

Al aumentar el peso molecular en las series homólogas de los líquidos hasta el dominio de los polímeros, la energía de activación al flujo  $E_a$  no crece proporcionalmente con el calor de vaporización, sino que se estabiliza con un valor independiente del peso molecular (Castellan, 1987), por lo que grandes valores de la energía de activación indican que la viscosidad disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura (Steffe, 1996).

El estudio de la energía de activación se ha realizado a diversos alimentos, principalmente jugos y néctares, entre los que se encuentran los trabajos de Alvarado, (1993) a jugos filtrados de doce frutas; Saravacos, (1970) en jugos (concentrados y clarificados) y pulpas de frutas, así mismo se han realizado algunos estudios reológicos de la pulpa de guayaba con respecto a la temperatura (Sánchez y col., 2006; Vitali y Rao, 1982 y Zainal y col., 2000). En estos reportes se ha relacionado a la energía de activación con la concentración de sólidos solubles con resultados contradictorios. Es

evidente que las diferencias en la composición y estructura en productos derivados de frutas hacen que sus propiedades dependan además de la variedad, grado de madurez, y tratamiento previo aplicado, al tamaño de partícula.

En la literatura se ha intentado relacionar el efecto de tamaño y distribución de la partícula en las propiedades reológicas de pulpas de jaboticaba (Sato y Cunha, 2009), pulpas de melocotón y ciruela (Lozano e Ibarz 1994) y concentrados de tomate (Tanglerpaibul y Rao, 1987; Den Ouden y Van Vliet, 1997). Los resultados de estos estudios también son contradictorias sugiriendo estudiar otros parámetros propios de las partículas como su forma y dureza. La incorporación de esferas de vidrio a la pulpa de guayaba permitiría controlar el tamaño y forma determinando su relación con la energía de activación.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1. OBJETIVOS**

##### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de la concentración de las partículas provenientes de la semilla de guayaba y esferas de vidrio en el comportamiento al flujo a diferentes temperaturas, mediante el estudio bajo cizalla rotacional, para relacionarla con la energía de activación.

##### **OBJETIVO PARTICULAR 1**

Determinar las propiedades fisicoquímicas (pH, acidez, °Brix), tamaño de partícula y sólidos totales de la pulpa de guayaba elaborada y comercial para establecer parámetros de control que permitan elaborar mezclas de pulpa de guayaba.

##### **OBJETIVO PARTICULAR 2**

Determinar los parámetros reológicos a diferentes temperaturas y concentración de partículas (semillas de guayaba y esferas de vidrio) en la pulpa de guayaba, mediante pruebas rotacionales para la obtención y relación de la viscosidad y energía de activación al flujo.

##### **OBJETIVO PARTICULAR 3**

Establecer el efecto de la concentración de las partículas (semillas de guayaba y esferas de vidrio) en la energía de activación de la viscosidad en condiciones de cizallamiento a un tiempo definido (no equilibrio) y cuando no hay dependencia con el tiempo de cizallamiento (equilibrio) para establecer la relación entre ellos.

## **2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.2.1 MATERIALES**

- ◆ Se utilizaron guayabas variedad Criolla en similar estado de maduración, que se consiguieron en un mercado local de Atizapán de Zaragoza, Estado de México, para la obtención de la pulpa.
- ◆ Pulpa comercial de guayaba marca F Díaz de México S.A., la cual contiene de acuerdo a la etiqueta: pulpa (de acuerdo a la fruta), agua, ácido cítrico, 0.1% de benzoato de sodio y sorbato de potasio.
- ◆ Micro esferas de vidrio tipo "A", densidad= 1.100 g/cm<sup>3</sup>, 3.64 μm, fabricante: DJB SA. DE CV.

### **2.2.2 MÉTODOS**

#### **2.2.2.1. Obtención de la pulpa de guayaba y extracción de las semillas**

Para la obtención de la pulpa (Figura 2.1), las guayabas fueron sometidas a una limpieza con un cuchillo, en donde se retiraron los tallos de las guayabas. Luego se lavaron mediante inmersión en agua corriente con detergente y posteriormente se llevó a cabo un enjuagado con agua corriente. Para el escaldado, la fruta fue sumergida en agua a 96°C de 2-3 minutos, después de ese tiempo se retiró rápidamente y fue sumergida en agua a 7°C durante 5 minutos. La fruta fue cortada en trozos, para facilitar el retiro de las semillas del interior del fruto. El despulpado se realizó de forma manual retirando la semilla junto con la pulpa adherida a ellas del interior de la guayaba, la cual fue tamizada en una malla #20 (0.841 mm), para retener las semillas y lavarlas con agua corriente, secarlas a 40°C durante 17 h y posteriormente fueron molidas con un molino marca General Electric a 1725 rpm, durante 30 min. Las semillas molidas luego se tamizaron, utilizando para la experimentación solo las semillas que pasaron la malla del #40 (0.420 mm). La pulpa restante, que está adherida a la cáscara de la guayaba, fue mezclada con una batidora de brazo marca Taurus a la velocidad máxima durante 5 minutos. Se colocó el total de la pulpa en un agitador IKA modelo

RW20 (EUA) a 4200 rpm durante 5 min. Se pesaron 200 g de pulpa y se envasaron en vasos de plástico tapados. Los vasos se almacenaron en un congelador a  $-23^{\circ}\text{C}$  y se descongelaron por calentamiento indirecto, por convección térmica del agua a  $80^{\circ}\text{C}$ , antes de su evaluación.

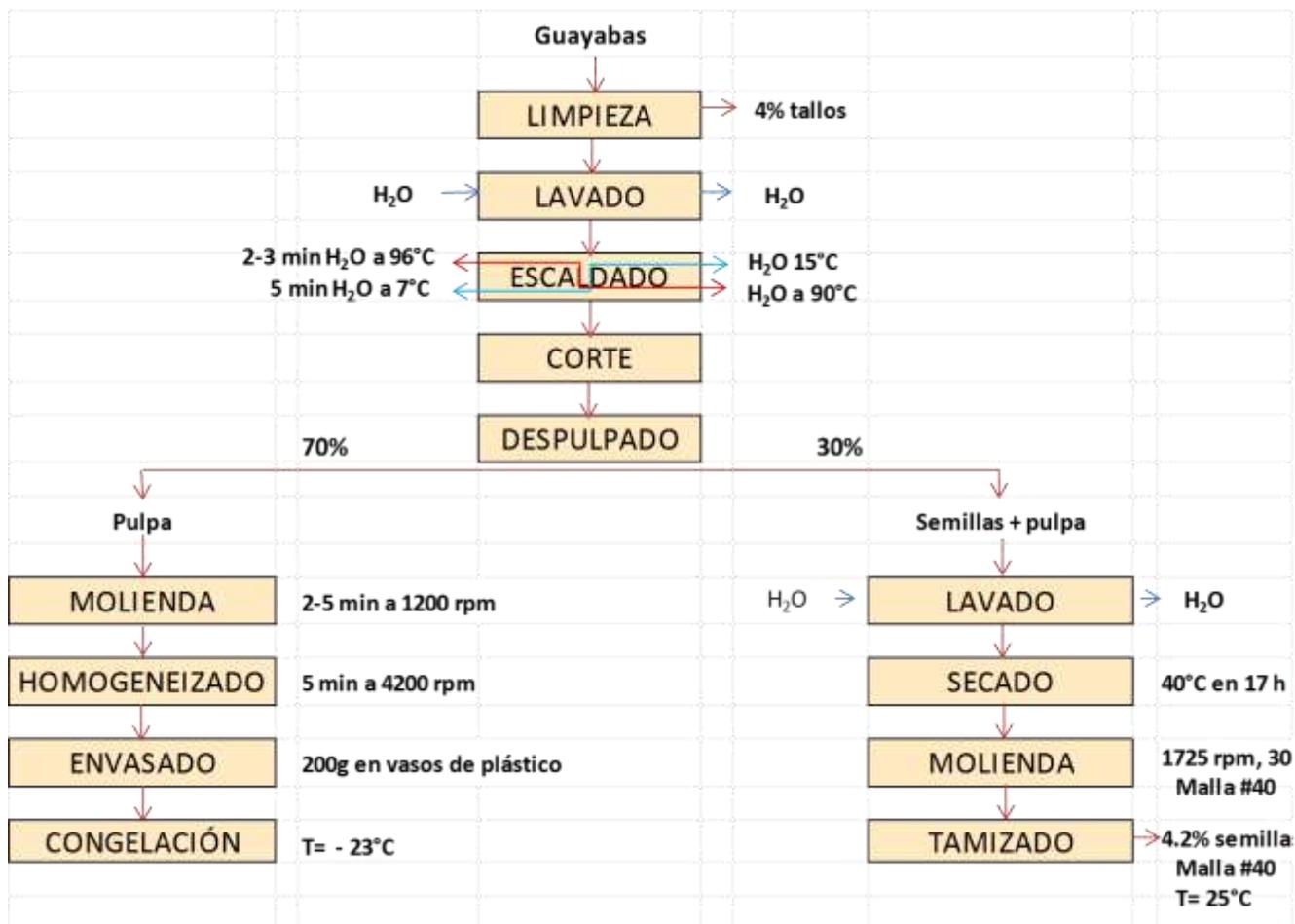


Figura 2.1. Diagrama de proceso para la elaboración de pulpa de guayaba y la separación de las semillas.

### **2.2.2.2. Preparación de la pulpa de guayaba con y sin semillas**

Considerando los sólidos totales de la pulpa de guayaba comercial y comparándolos con los contenidos en la pulpa natural, se agregó agua a la pulpa natural para igualar el porcentaje de sólidos totales contenidos en la pulpa comercial, obteniendo un preparado de pulpa con el que posteriormente se realizaron suspensiones de 10 y 20% de concentración de semillas de guayaba y de esferas de vidrio.

### **2.2.2.3. Evaluación de propiedades fisicoquímicas y sólidos totales de la pulpa de guayaba**

#### **Determinación de sólidos solubles**

Se determinaron los sólidos solubles de la pulpa natural y comercial con y sin filtrar utilizando un refractómetro Abbé, marca Erma Tokyo (Japón), modelo 16571.

Fundamento: El índice de refracción de una muestra es un valor que relaciona el ángulo de incidencia de un rayo luminoso sobre una muestra con el ángulo de refracción, el refractómetro mide el cambio de dirección que se produce cuando un rayo de luz pasa a través de una sustancia (González, 1996).

Procedimiento: Se verificó que el equipo estuviera calibrado con un índice de refracción del agua destilada a 20°C de 1.3330. Después se colocaron las muestras (pulpa natural y pulpa comercial) sin filtrar sobre el prisma limpio y se giró el tornillo hasta observar bien la línea de separación claro- oscura con la cruz y se leyó el índice de refracción en la escala inferior. Posteriormente se realizó otra lectura donde las muestras (pulpa natural y pulpa comercial) se filtraron en un medio filtrante de lana de vidrio, para retirar fibras y compuestos grandes suspendidos en la pulpa antes de ser colocada en el prisma para tener una lectura de los sólidos solubles. Esto se hizo para que después de conocer la cantidad de sólidos solubles de ambas pulpas (natural y comercial) se pudieran igualar adicionando agua. Se realizaron cinco determinaciones por cada muestra.

## Determinación de acidez de la pulpa de guayaba natural

La acidez es importante para determinar el grado de madurez, ya que la acidez disminuye con el aumento de la madurez (Salazar, 2012). El valor fue utilizado posteriormente en la determinación de la madurez de la pulpa de guayaba natural.

Fundamento: Cuando un ácido y una base reaccionan, se neutralizan sus propiedades para dar una sal y agua. Si ponemos una disolución de un ácido en un vaso, y una base en una bureta, al ir añadiendo, gota a gota, el ácido sobre la base, ésta se irá neutralizando hasta llegar a un punto (punto estequiométrico) en el que ha reaccionado toda la base con el ácido añadido, el cuál puede observarse mediante la adición de un indicador.

Procedimiento: El porcentaje de acidez se determinó mediante una titulación ácido-base, con la ayuda de una bureta, fenolftaleína como sustancia indicadora y como titulante hidróxido de sodio (1N). Se realizaron 5 repeticiones. El resultado se expresó en porcentaje del ácido cítrico que es el que predomina en la pulpa de guayaba (Aranceta y Pérez-Rodrigo, 2006).

$$\% \text{ acidez} = \frac{(ml \text{ NaOH}) (N \text{ NaOH})(meq. \text{ ac. cítrico})100}{W \text{ muestra}} \quad (7)$$

Dónde:

$N$ : Normalidad del NaOH= (1N)

$meq.$ : Miliequivalentes del ácido (cítrico= 0.064 g/mol) (Peso molecular ácido= peso en g/mol/1000)

$W$ : peso de la muestra (g)

## **Determinación de la madurez de la pulpa de guayaba natural**

El valor del índice de madurez se hace mayor cuando la fruta avanza en su proceso de maduración natural. Los azúcares aumentan porque llegan de diversas partes de la planta a la fruta y los ácidos disminuyen porque son gastados en la respiración de la planta, de tal forma que ocurre el natural aumento de sus °Bx y disminución de su grado de acidez (Salazar, 2012).

La madurez del fruto se calculó mediante la ecuación 8 de *índice de madurez*, donde se relaciona el contenido de azúcares y su porcentaje de acidez:

$$\text{índice de madurez (IM)} = \frac{\text{° Brix}}{\text{Acidez}} \quad (8)$$

## **Determinación de pH**

La medición de pH de las pulpas de guayaba se realizó en un medidor de pH portátil, marca OAKTON (E.U.A.), modelo WP pH Testr 3 DJ.

Fundamento: La concentración de los iones de H u OH en agua, determinan la alcalinidad, acidez o neutralidad de las soluciones acuosas. Mientras más grande es la concentración de iones hidrógeno, más bajo es el pH de una solución. Se utiliza la diferencia de un potencial eléctrico entre dos soluciones de diferente pH, separadas por una membrana de vidrio especial (Noriega, 2010).

Procedimiento: Se sumergió el electrodo directamente en la pulpa de guayaba siguiendo lo descrito en la norma mexicana NMX-F-317-S-1978 para determinación de pH en alimentos, donde se toma la lectura directamente, con 5 repeticiones.

## **Determinación de sólidos totales**

La determinación de sólidos totales se realizó en una termobalanza digital, marca Ohaus (E. U. A.), modelo MB45.

Principio de operación: La humedad es tomada como la pérdida de peso al secado, usando un instrumento de humedad, el cual emplea una balanza de torsión sensible donde se pasa la muestra y una lámpara infrarroja para secar (NMX-F-428-1982, 1982).

Procedimiento: Se colocó la muestra a evaluar en la charola del equipo, se cerró la tapa y se colocó el programa A60 (donde la A indica desconexión automática cuando el peso no varía y el 60 indica el tiempo en segundos en que se hará esa desconexión) a una temperatura de 90°C para la pulpa, la lectura la calcula el equipo en porcentaje de humedad, por lo que el resto (100- humedad) es el porcentaje de sólidos totales contenidos en la muestra.

Los sólidos no solubles se obtienen de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos solubles, medidos como °Brix.

### **2.2.2.4. Estudio reológico en cizalla rotacional de la pulpa de guayaba con semillas y esferas de vidrio al 10 y 20%**

El estudio del comportamiento al flujo se realizó en un reómetro de cilindros concéntricos marca Haake (Alemania), modelo RT-20, con la geometría de cilindro Z20-DIN con características de radio interno: 10 mm, radio externo: 10.85 mm, longitud efectiva: 30 mm y un volumen de muestra: 8.2 ml. Para el control de la temperatura el reómetro cuenta con un sistema de enfriamiento y calentamiento por recirculación de agua (baño térmico marca Haake, modelo C25).

Principio de operación: Se transfiere cantidad de movimiento en la muestra contenida entre los dos cilindros, desde el cilindro que gira a una velocidad de rotación, hasta la parte del cilindro que contiene la muestra. Se mide el par de torsión o torque del motor, requerido para moverla y se transforma esfuerzo de cizalla por una constante, dependiendo de la geometría utilizada. La velocidad de rotación se transforma en

velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones de la geometría. La viscosidad se calcula a través del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla, que es una medida de la resistencia a transferir cantidad de movimiento (Martínez-Padilla, 2012).

Procedimiento: La muestra a utilizar se descongeló por calentamiento indirecto por convección térmica del agua a 80°C, después de lo cual se atemperó según la temperatura requerida para la prueba. La determinación del comportamiento al flujo de la pulpa de guayaba para cada temperatura se realizó empleando dos métodos, evaluando el efecto de una primera curva de flujo en las condiciones de equilibrio (cizalla constante) para poder compararlos y determinar si existía algún cambio en el comportamiento del fluido después de la cizalla constante.

En el primer método la muestra fue cizallada a una velocidad de cizalla constante de 500 s<sup>-1</sup>, por un tiempo en que la viscosidad se vuelve constante (condiciones de equilibrio) que depende de la temperatura, se determinó mediante una experimentación previa que a 5°C el tiempo fue de 1200 s, para 15°C fue de 950 s, para 25°C de 750 s, para 35 y 45°C fue de 400 s y para 55 y 65°C fue de 50 s, posteriormente se realizó una curva de descenso de una velocidad de cizalla de 500 s<sup>-1</sup> hasta 0.1 s<sup>-1</sup> por un tiempo de 180 s en 60 puntos, seguido de un ascenso de 0.1 s<sup>-1</sup> a 500 s<sup>-1</sup> de velocidad de cizalla durante 180 s en 60 puntos.

En el segundo método se realizó una curva de flujo de ascenso desde una velocidad de cizalla de 0.1 s<sup>-1</sup> hasta 500 s<sup>-1</sup> por un tiempo de 180 s en 60 puntos, después se mantuvo una velocidad de cizalla de 500 s<sup>-1</sup> por un tiempo que depende de la temperatura, utilizándose los mismos tiempos que el primer método, posteriormente se realizó una curva de descenso de una velocidad de cizalla de 500 s<sup>-1</sup> hasta 0.1 s<sup>-1</sup> por un tiempo de 180 s en 60 puntos, seguido de un ascenso de 0.1 s<sup>-1</sup> a 500 s<sup>-1</sup> de velocidad de cizalla durante 180 s en 60 puntos.

Se realizaron 3 repeticiones, los datos de esfuerzo de cizalla, velocidad de cizalla y viscosidad fueron calculados por el software del equipo.

De ambos métodos de la curva de descenso y ascenso se determinó el modelo reológico que mejor ajustó a los datos experimentales. Primeramente se realizó la curva

de flujo graficando esfuerzo de cizalla (Pa) en función de la velocidad de cizalla ( $s^{-1}$ ). Para obtener los parámetros reológicos del modelo de Ostwald-de Waele se utilizó una regresión tipo potencia.

En el modelo Herschel-Bulkley el valor de  $\sigma_0$  se calculó extrapolando la gráfica de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla hasta que se intersecte con el eje del esfuerzo de cizalla, siguiendo la misma tendencia de la curva, tomando ese valor como el esfuerzo inicial. El valor de esfuerzo inicial se le restó a los valores de esfuerzo de cizalla experimentales y se volvió a realizar la curva de flujo, los parámetros reológicos se obtuvieron utilizando una regresión tipo potencia, si el coeficiente de correlación “r”, fue mayor al obtenido para un fluido de la Potencia, entonces se pudo decir que era un fluido Herschel- Bulkley.

De los parámetros reológicos obtenidos se calcularon las medidas de tendencia central: promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Considerando los promedios de los parámetros reológicos mencionados se calculó la viscosidad a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500  $s^{-1}$ ), para un fluido que se ajusta al modelo de la potencia, la ecuación de la viscosidad es:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

El efecto de la temperatura en la viscosidad evaluada a 10, 50 y 100  $s^{-1}$  se determinó con la ecuación de Arrhenius, la cual desarrollada es:

$$\ln \eta = \ln \eta_{\infty} - \frac{Ea}{RT} \quad (10)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad (Pa-s),  $\eta_{\infty}$  es el factor preexponencial o factor de frecuencia asociado con tasas de colisión (adimensional),  $Ea$  es la energía de activación al flujo viscoso (kJ/mol),  $R$  es la constante universal de los gases (8.314 kJ/Kgmol K) y  $T$  es la temperatura (K). Por tanto se grafica  $\ln \eta$  en función del  $1/T$ , de

la pendiente se calcula la energía de activación ( $E_a$ ) el cuál es dividido entre 1000 para obtener su valor en unidades de kJ/gmol y de la ordenada al origen se obtiene el factor preexponencial  $\eta_{\infty}$ . que es considerada la viscosidad a una temperatura infinita (Chang y Hartel, 1997)

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Propiedades fisicoquímicas y sólidos totales de la pulpa de guayaba

En el Cuadro 3.1 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas y sólidos totales de la pulpa comercial, la pulpa elaborada a partir de la guayaba y la pulpa formulada.

Cuadro 3.1. Propiedades fisicoquímicas y sólidos totales de las diferentes pulpas de guayaba.

PARÁMETROS MEDIDOS	PULPA COMERCIAL			PULPA NATURAL			PULPA ELABORADA		
	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V. (%)	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V. (%)	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V. (%)
° Brix	5.0	0.0	0.0	9.7	0.2	2.5	6.0	0.0	0.0
Sólidos totales (%)	11.9	0.0	0.0	16.4	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0
Humedad (%)	88.0	0.3	2.6	83.5	0.2	1.2	88.6	0.1	0.8
Sólidos no solubles (%)	6.9	0.0	0.0	6.6	0.2	2.5	5.3	0.0	0.0
pH	3.3	0.0	2.4	3.8	0.0	0.5	3.7	0.0	0.2

La pulpa comercial contiene 51.3% menos sólidos solubles con respecto a la pulpa natural, ya que sólo presenta 5 °Bx mientras que la pulpa natural contiene 9.7 °Bx, esto debido a la adición de agua encontrada en la formulación de la pulpa comercial, tal como indica la etiqueta de dicho producto, por lo que al elaborar la pulpa los grados Brix se redujeron un 38.5%, para alcanzar un valor de 6°Bx, valor semejante a la pulpa comercial.

Los sólidos totales también se modificaron al establecer la pulpa formulada, ya que de 16.4% que se tenían en la pulpa natural, se redujeron hasta un valor de 11.3%, el cual representa el 68.8% de sólidos totales contenidos en la pulpa natural, aproximándose al 72.9% de sólidos totales que contiene la pulpa comercial con respecto a la pulpa natural.

La humedad se incrementó de la pulpa natural a la pulpa formulada en un 6.1% para que esta última se igualará con el valor de humedad de la pulpa comercial. En cuanto a los sólidos no solubles el valor más alto es para la pulpa comercial, que sólo difiere el 4.1% con respecto a la pulpa natural y el 23.9% con respecto a la pulpa formulada, debido a la adición de agua.

Los sólidos totales de la pulpa natural son mayores que los sólidos totales de la pulpa comercial y la pulpa formulada debido a que a la pulpa natural no se le adicionó más agua de la que contiene la misma fruta. El valor del pH de la pulpa se encuentra entre el 3.33 y el 3.82. En la pulpa comercial es más bajo el valor del pH debido a que contiene benzoato de sodio y sorbato de potasio como conservadores, los cuales son bases débiles (Atkins y Jones, 2007), y por tanto neutralizan el ácido de la pulpa.

El grado de madurez de la guayaba se determinó evaluando la acidez de la pulpa obtenida de la guayaba, relacionándola con el índice de madurez, los resultados se presentan en el Cuadro 3.2. De acuerdo a los reportes de Wilson y col. (1982) la acidez de las guayabas puede tener valores hasta 0.469 % de ácido cítrico, por lo que la acidez obtenida se encuentra dentro del intervalo.

Cuadro 3.2. Acidez e índice de madurez en la pulpa de guayaba natural.

<b>Parámetro</b>	$\bar{x}$	$\sigma$	C.V. (%)
<b>Acidez (%)</b>	0.36	0.03	0.12
<b>Índice de madurez</b>	27.08	0.03	0.12

De acuerdo con lo reportado por Laguado y col. (1995) la guayaba utilizada es considerada como un fruto verde ya que el índice de madurez obtenido (27.08) se encuentra cerca del intervalo de 28.86 a 38.98. Los valores del índice de madurez van aumentando conforme avanza el estado de desarrollo del fruto debido a que los frutos tienden a disminuir la acidez titulable y a incrementar el contenido de azúcares (Avilán y Bautista, 1989), los cuáles aumentan la viscosidad de la pulpa.

### 3.2. Comportamiento al flujo de la pulpa de guayaba sin semillas

La curva de flujo de la pulpa de guayaba sin semillas realizada por ambos métodos se presenta en la Figura 3.1. El primer método consta de una cizalla constante y dos curvas de flujo en descenso y ascenso (Figura 3.1a). En el segundo método se realizó una curva de flujo de ascenso, posteriormente una cizalla constante y finalmente una curva de flujo en descenso y ascenso (Figura 3.1b). Se observa que la pulpa de guayaba sin semillas presenta dependencia con el tiempo, siendo evidente la presencia de histéresis en el método 2, ya que la curva de primer ascenso y descenso no coincide, después del cizallamiento constante se alcanzan condiciones de independencia del tiempo de cizalla.

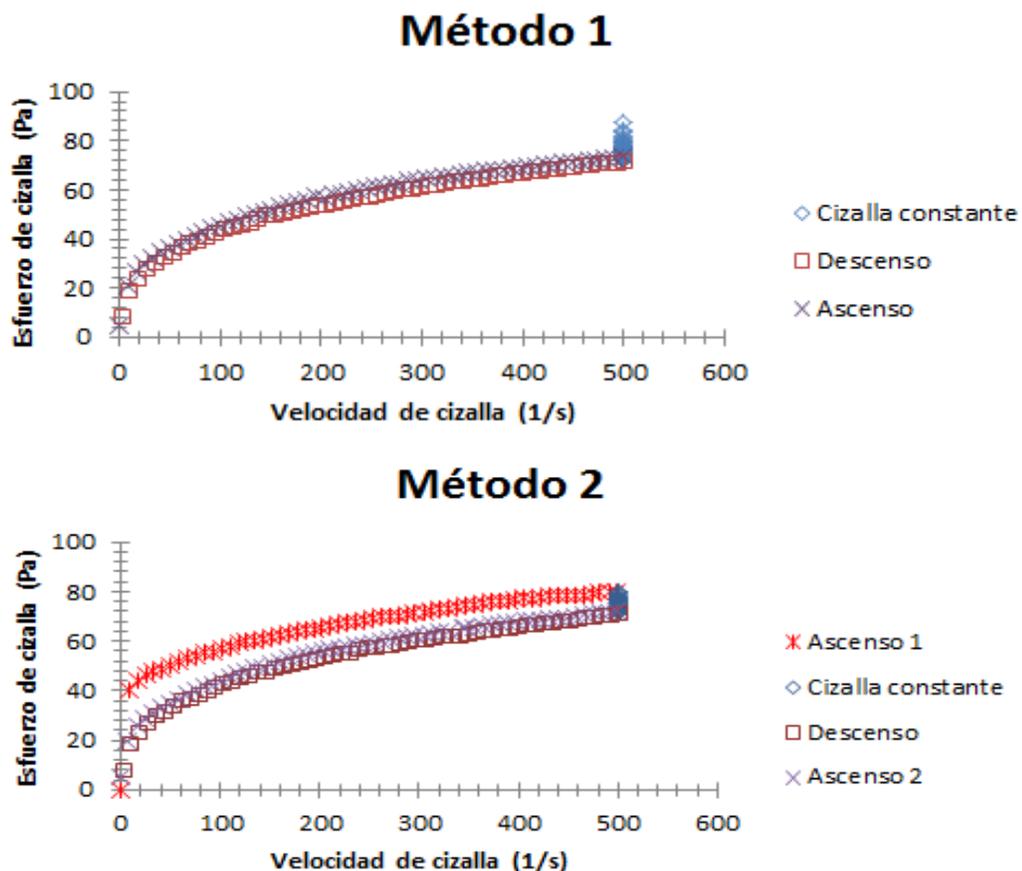


Figura 3.1. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba sin semillas a 25°C, a) Método 1 y b) Método 2.

De las condiciones de velocidad de cizalla constante de ambos métodos se graficó la viscosidad en función del tiempo de cizallamiento para cada temperatura, el comportamiento se muestra en la Figura 3.2, en donde se observa que la viscosidad decrece con el tiempo de cizallamiento y llega un momento en que no cambia con el tiempo debido a la orientación o deformación de las partículas por la acción de la cizalla (Windhab, 1995). El tiempo en que se alcanzan condiciones donde la viscosidad tiende a ser constante dependió de la temperatura.

Se seleccionó el primer y el último valor de la viscosidad reportado por el software del equipo. De la Figura 3.2 el primer valor de la viscosidad es considerado en condiciones de dependencia del tiempo y el último valor es considerado en condiciones independientes del tiempo. Ambos valores para cada método se presentan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Viscosidad a velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$ , diferentes tiempos de cizallamiento y temperaturas, de la pulpa de guayaba para ambos métodos.

T (°C)	Tiempo de cizallamiento (s)	MÉTODO 1			MÉTODO 2		
		$\eta$ (Pa·s)	$\sigma$	CV (%)	$\eta$ (Pa·s)	$\sigma$	CV (%)
5	20.39	0.224	0.007	0.032	0.217	0.005	0.023
	1200	0.186	0.004	0.023	0.190	0.002	0.011
15	16.16	0.194	0.006	0.033	0.187	0.001	0.008
	950	0.169	0.002	0.013	0.168	0.001	0.008
25	12.76	0.174	0.000	0.000	0.157	0.003	0.018
	750	0.144	0.001	0.005	0.140	0.004	0.030
35	3.93	0.158	0.004	0.022	0.148	0.001	0.010
	200	0.132	0.002	0.016	0.143	0.001	0.010
45	3.43	0.134	0.007	0.053	0.117	0.000	0.000
	200	0.117	0.004	0.030	0.110	0.003	0.026
55	0.82	0.127	0.006	0.450	0.106	0.003	0.027
	50	0.111	0.004	0.032	0.105	0.001	0.013
65	0.90	0.141	0.004	0.030	0.108	0.003	0.026
	50	0.129	0.010	0.077	0.104	0.003	0.027

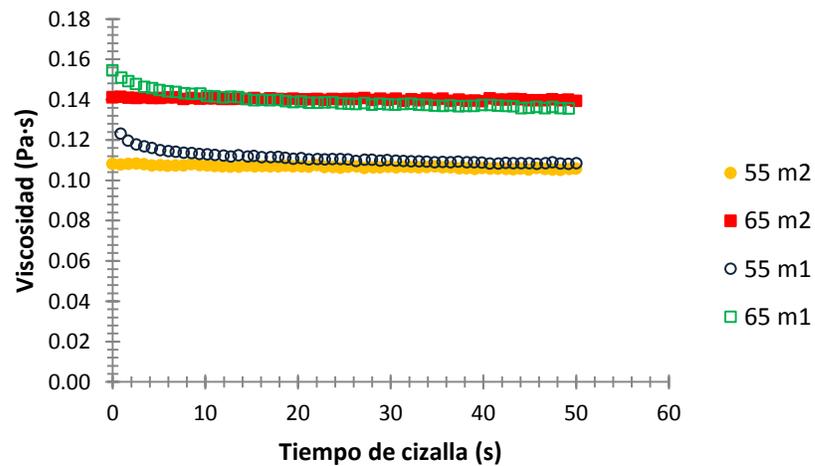
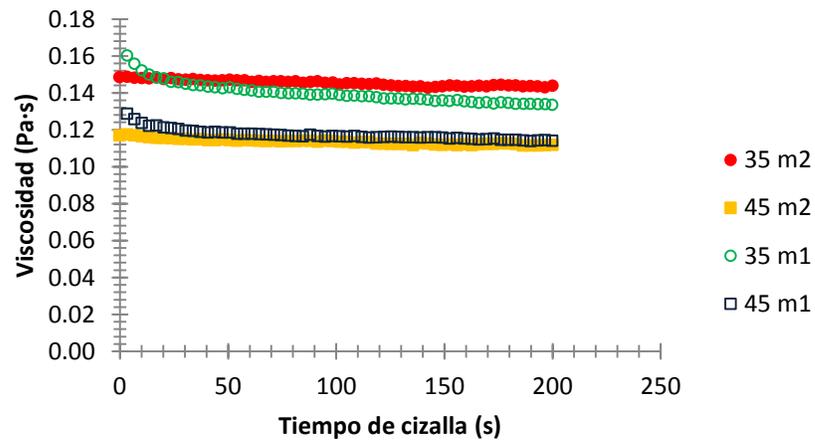
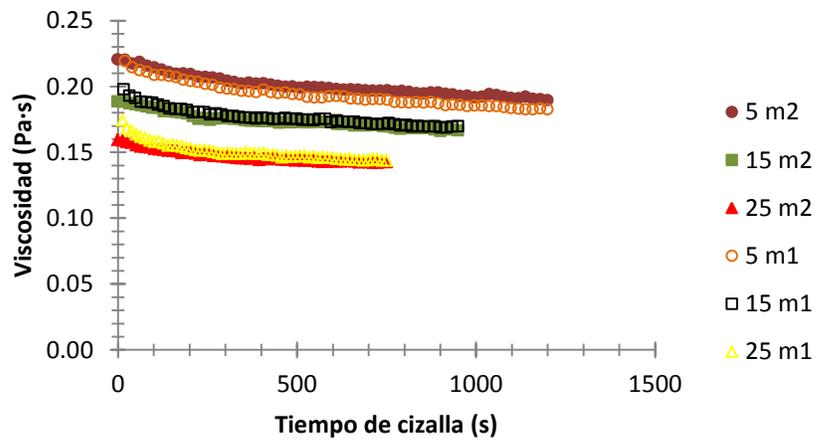


Figura 3.2. Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$  de la pulpa de guayaba sin semillas a diferentes temperaturas para el método 1 (m1) y el método 2 (m2).

En condiciones de dependencia del tiempo la viscosidad disminuye un 37.06% (0.224 a 0.141 Pa·s) en el método 1 y en el método 2 disminuye el 50.23% (0.217-0.108 Pa·s). Para determinar si estadísticamente los valores de viscosidad son considerados iguales entre los dos métodos estudiados, para una misma temperatura, se utilizó el método de diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de significancia de 1% ( $\alpha = 0.005$ ) y planteando las siguientes hipótesis:

$$o \quad \eta_{m1} = \eta_{m2} = 0 \quad (11)$$

$$i \quad \eta_{m1} \neq \eta_{m2} \neq 0 \quad (12)$$

En la hipótesis nula (  $o$  ) se infiere que la diferencia entre la viscosidad del método 1 ( $m_1$ ) y del método 2 ( $m_2$ ) para una misma temperatura es igual a cero. La hipótesis alterna (  $i$  ) propone que la diferencia entre el valor de la viscosidad del método 1 ( $m_1$ ) y la viscosidad del método 2 ( $m_2$ ) es diferente a cero a la misma temperatura.

En el cuadro 3.4 se presentan los resultados de los valores de DMS, el valor de la diferencia de medias y la aceptación o rechazo de la hipótesis para la viscosidad.

Cuadro 3.4. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) de la viscosidad a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	DMS	$\bar{X}_{m1} - \bar{X}_{m2}$	Hipótesis
5	0.111	0.065	Acepta $o$
15	0.028	0.011	Acepta $o$
25	0.040	0.025	Acepta $o$
35	0.011	0.026	Acepta $o$
45	0.169	0.015	Acepta $o$
55	0.065	0.013	Acepta $o$
65	0.496	0.050	Acepta $o$

Cómo el valor de la diferencia de medias ( $X_{m1}-X_{m2}$ ) es menor al valor de la diferencia mínima significativa (DMS) se acepta  $H_0$ , por lo que estadísticamente no existe diferencia entre la obtención del valor de la viscosidad al emplear el método 1 o el método 2 para cada temperatura de estudio, ya que en ambos métodos se alcanzaron condiciones de equilibrio.

Una vez que la pulpa de guayaba sin semilla alcanzó condiciones donde la viscosidad es independiente del tiempo de cizallamiento, la pulpa fue cizallada en forma descendente y ascendente. En la Figura 3.3 se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para ambos métodos presentando sólo la curva de ascenso. En todas las muestras el comportamiento es no-newtoniano ya que la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla es no lineal, tipo adelgazante a la cizalla donde la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla, como se presenta en la Figura 3.4.

A partir de las curvas de flujo obtenidas para las diferentes temperaturas se ajustaron los datos a los modelos de Ostwald-de Waele y Hershel-Bulkley, por el valor del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) el modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Ostwald-de Waele a partir del cual se obtuvieron los parámetros reológicos índice de consistencia ( $k$ ), índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), los cuales se presentan en el Cuadro 3.5.

En el Cuadro 3.5 se observa que a la misma temperatura el índice de consistencia ( $k$ ) no depende del método utilizado. Para ambos métodos  $k$  disminuye con el aumento de la temperatura en el intervalo de 5 a 35°C, a partir de la temperatura de 35 hasta 65°C, el valor del índice de consistencia se puede considerar constante con un valor aproximadamente de 7 debido a que la diferencia numérica se da en la primer cifra decimal, aunque también se observa que sigue una tendencia a disminuir, excepto por el valor de 65°C en donde se nota un ligero aumento, lo cual pudiera deberse como lo explica, Nindo y col., (2005), a altas temperaturas las partículas suspendidas propias de la pulpa pueden separarse entre sí y aglomerarse a las paredes de la geometría, lo cual causa este tipo de fluctuaciones.

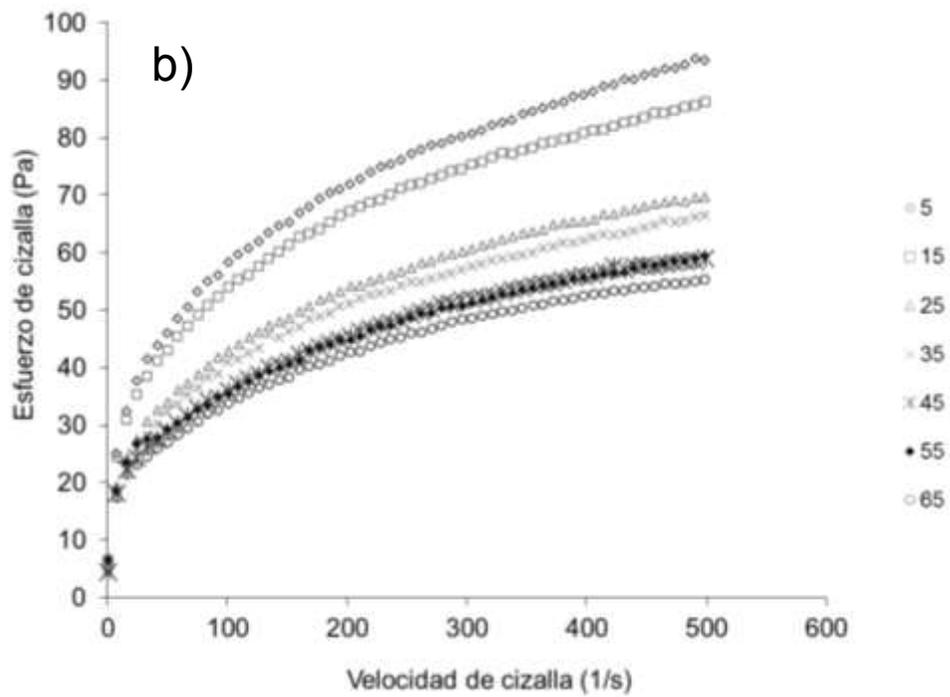
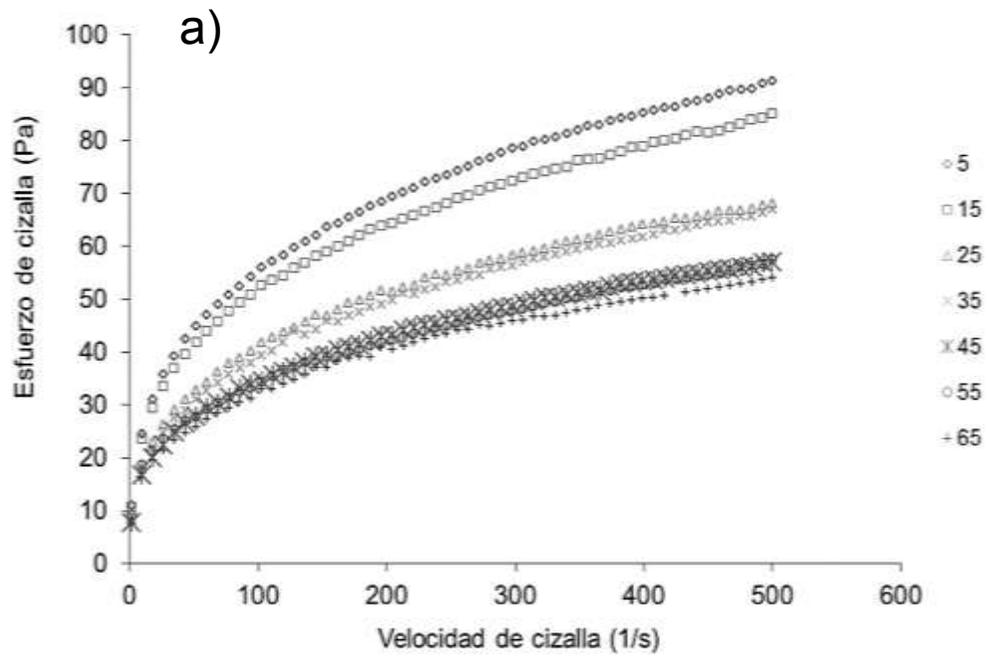


Figura 3.3. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa sin semillas a diferentes temperaturas a) Método 1 y b) Método 2.

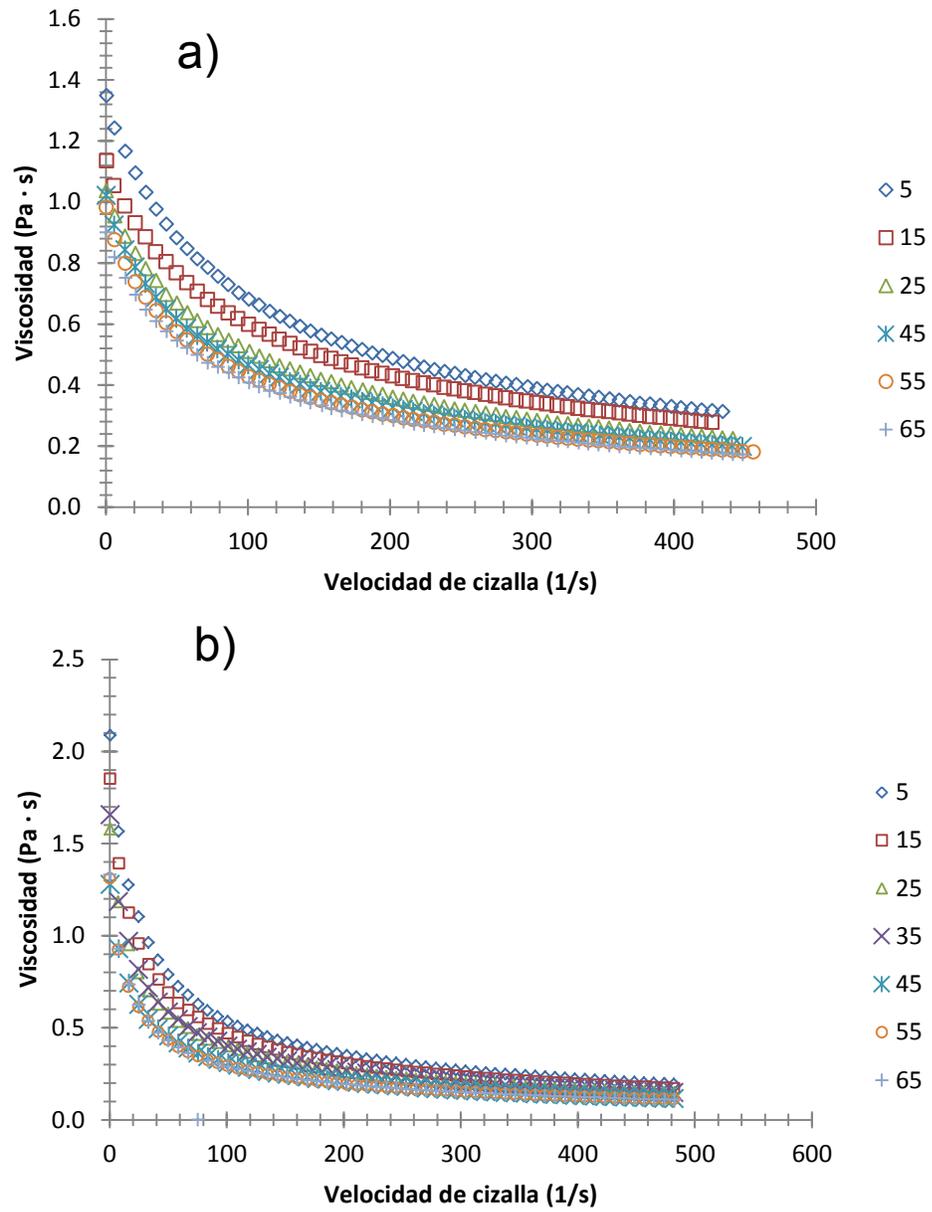


Figura 3.4. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a diferentes temperaturas, a) Método 1 y b) Método 2.

Cuadro 3.5. Parámetros reológicos del modelo Ostwald-de Waele a diferentes temperaturas de la pulpa de guayaba sin semillas para ambos métodos.

T (°C)	MÉTODO 1			MÉTODO 2		
	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	r <sup>2</sup>	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	r <sup>2</sup>
5	<b>11.67</b> ± 0.32 * 2.71	<b>0.34</b> ± 0.00 * 1.00	0.9942	<b>11.90</b> ± 0.15 * 1.29	<b>0.34</b> ± 0.00 * 0.89	0.9945
15	<b>11.01</b> ± 0.05 * 0.47	<b>0.34</b> ± 0.00 * 0.67	0.9946	<b>10.83</b> ± 0.19 * 1.75	<b>0.34</b> ± 0.01 * 2.31	0.9959
25	<b>8.67</b> ± 0.34 * 3.95	<b>0.34</b> ± 0.00 * 1.04	0.9972	<b>8.49</b> ± 0.07 * 0.88	<b>0.34</b> ± 0.01 * 1.83	0.9935
35	<b>7.95</b> ± 0.36 * 4.54	<b>0.34</b> ± 0.01 * 1.46	0.9990	<b>7.98</b> ± 0.48 * 5.97	<b>0.34</b> ± 0.00 * 0.65	0.9979
45	<b>7.67</b> ± 0.20 * 2.66	<b>0.33</b> ± 0.00 * 0.56	0.9984	<b>7.08</b> ± 0.19 * 2.75	<b>0.34</b> ± 0.01 * 2.68	0.9974
55	<b>7.53</b> ± 0.14 * 1.82	<b>0.32</b> ± 0.02 * 5.87	0.9983	<b>7.65</b> ± 0.34 * 4.49	<b>0.32</b> ± 0.01 * 4.55	0.9978
65	<b>7.67</b> ± 0.06 * 0.79	<b>0.31</b> ± 0.01 * 1.96	0.9961	<b>7.48</b> ± 0.23 * 3.06	<b>0.31</b> ± 0.00 * 0.40	0.9974

\*Coeficiente de variación (%)

En relación del valor del índice de comportamiento al flujo (n), éste no es afectado por la temperatura, en ambos métodos su valor es muy cercano a 0.3. Para determinar si estadísticamente los valores de los parámetros reológicos (k y n) son considerados iguales entre los dos métodos estudiados, para una misma temperatura, se utilizó el método de diferencia mínima significativa (DMS) con las mismas hipótesis que en el caso de la viscosidad.

En los Cuadros 3.6 y 3.7 se presentan los resultados de los valores de DMS, el valor de la diferencia de medias y la aceptación o rechazo de la hipótesis para el índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo respectivamente.

Cuadro 3.6. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{m1}-X_{m2}$	Hipótesis
5	1.753	0.145	Acepta <sub>o</sub>
15	0.974	0.111	Acepta <sub>o</sub>
25	1.722	0.315	Acepta <sub>o</sub>
35	1.023	0.735	Acepta <sub>o</sub>
45	1.368	0.595	Acepta <sub>o</sub>
55	1.824	0.220	Acepta <sub>o</sub>
65	1.179	0.105	Acepta <sub>o</sub>

Cuadro 3.7. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{m1}-X_{m2}$	Hipótesis
5	0.000	0.000	Acepta <sub>o</sub>
15	0.049	0.005	Acepta <sub>o</sub>
25	0.049	0.005	Acepta <sub>o</sub>
35	0.049	0.005	Acepta <sub>o</sub>
45	0.049	0.005	Acepta <sub>o</sub>
55	0.111	0.005	Acepta <sub>o</sub>
65	0.049	0.005	Acepta <sub>o</sub>

Cómo el valor de la diferencia de medias ( $X_{m1}-X_{m2}$ ) es menor al valor de la diferencia mínima significativa (DMS) se acepta <sub>o</sub>, por lo que estadísticamente no existe diferencia entre la obtención del índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo al emplear el método 1 ó el método 2 para cada temperatura de estudio, ya que en ambos métodos se alcanzaron condiciones de independendia del tiempo.

Debido a que el método de medición no afecta al modelo reológico al cual se ajustan los datos experimentales, se analizará solamente el método 2 para las suspensiones con las diferentes concentraciones de semilla de guayaba y esferas de vidrio.

Con los promedios de los parámetros reológicos del método 2, se calculó la viscosidad (Ec. 6) a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400, 500 s<sup>-1</sup>) para cada temperatura las cuales se presentan en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.8. Viscosidad evaluada a diferentes velocidades de cizalla y temperaturas de la pulpa de guayaba sin semillas.

T (°C)	Viscosidad (Pa·s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	11.903	2.612	0.573	0.363	0.278	0.230	0.199
15	10.831	2.358	0.513	0.324	0.248	0.205	0.177
25	8.487	1.874	0.414	0.263	0.201	0.167	0.144
35	7.980	1.806	0.398	0.253	0.193	0.160	0.138
45	7.086	1.627	0.343	0.214	0.163	0.134	0.115
55	7.650	1.660	0.339	0.210	0.159	0.131	0.112
65	7.481	1.566	0.319	0.198	0.149	0.122	0.105

La viscosidad evaluada a 1 s<sup>-1</sup> es el mismo que el valor del índice de consistencia y es su valor máximo calculado. La viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla un 98.44% en promedio, así como disminuye con el aumento de la temperatura en cada una de las velocidades de cizalla calculadas, debido a que con el aumento de la temperatura las fuerzas moleculares disminuyen, favoreciendo la disociación de los enlaces entre las partículas e incrementando la energía cinética de las moléculas, lo cual reduce la viscosidad (Ibarz y col., 1999; Shamsud y col., 2007).

### 3.3. Comportamiento al flujo de la pulpa con semillas y esferas (10 y 20%)

El esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba con semillas y esferas de vidrio al 10 y 20% muestran un comportamiento dependiente del tiempo similar que en el caso de la pulpa de guayaba sin semillas, donde la curva del primer ascenso no coincide con la curva de descenso presentando histéresis para ambas concentraciones de semillas y esferas, las curvas son similares a las que se obtuvieron con la pulpa sin semillas, por lo que se presentan en el Anexo 1.

Con las condiciones de velocidad de cizalla constante ( $500 \text{ s}^{-1}$ ) se graficó la viscosidad en función del tiempo de cizallamiento a las temperaturas estudiadas (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C). En la Figura 3.5 se presentan las curvas obtenidas de la pulpa de guayaba con 10% de semillas. Se observa que la viscosidad decrece lentamente hasta hacerse constante con el tiempo de cizallamiento debido probablemente a la orientación de las partículas (Windhab, 1995) y al acomodo de las partículas como las pectinas durante el cizallamiento (Saravacos, 1970). El tiempo en que se alcanzan condiciones de independencia del tiempo depende de la temperatura, siendo menor a temperaturas altas (65 °C el tiempo es de 50 s) y mayor a temperaturas bajas (5 °C el tiempo es de 1200 s). El mismo comportamiento se presentó en la pulpa de guayaba con 20% de semilla, 10 y 20 % de esferas de vidrio (Anexo 2).

De estas gráficas, se seleccionó el primer tiempo con su respectivo valor de viscosidad proporcionada por el software del reómetro y el último valor de viscosidad de cada temperatura. Ambos valores se presentan en el Cuadro 3.9 el primer valor de la viscosidad corresponde a condiciones de dependencia con el tiempo (condición de no equilibrio) y último valor a condiciones de independencia con el tiempo (condición de equilibrio).

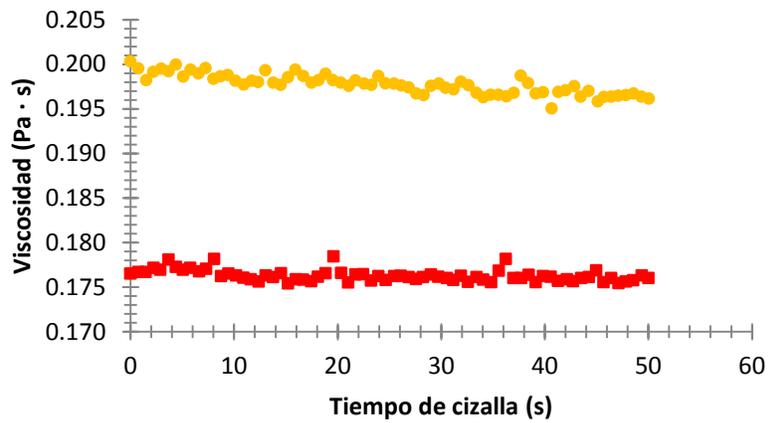
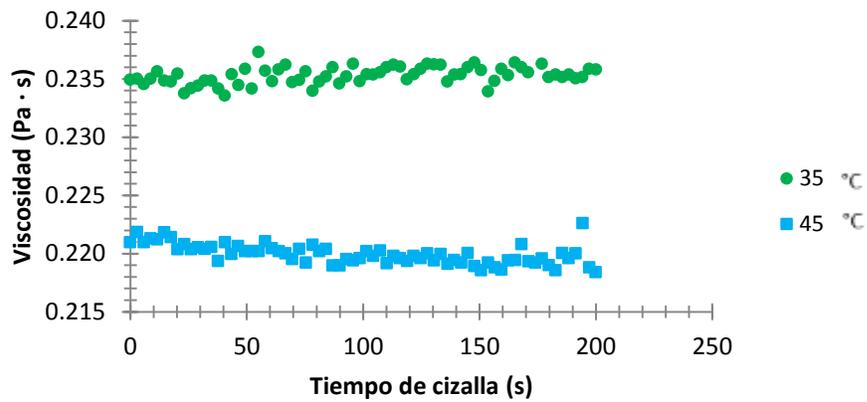
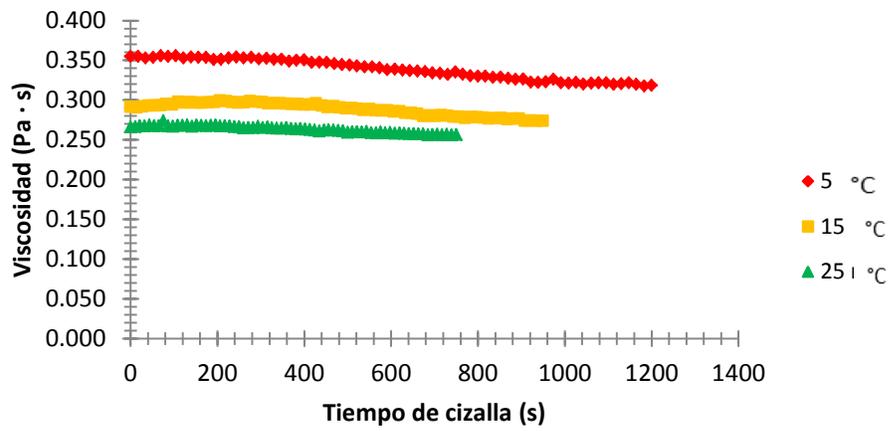


Figura 3.5. Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$  para la pulpa de guayaba con 10% de semillas a diferentes temperaturas.

Cuadro 3.9. Viscosidad obtenida a una velocidad de cizalla constante de 500 s<sup>-1</sup> al primer y último tiempo de cizalla aplicada en la pulpa de guayaba con 10 y 20% de semillas y esferas de vidrio.

T (°C)	Tiempo de cizallamiento	10% semillas de guayaba	20% semillas de guayaba	10% esferas de vidrio	20% esferas de vidrio
5	17.56	Viscosidad (Pa·s)			
		<b>0.351</b> ±0.006 *1.61	<b>0.444</b> ±0.011 *2.40	<b>0.363</b> ±0.001 *0.234	<b>0.287</b> ±0.001 *0.493
	1200	<b>0.314</b> ±0.008 *2.48	<b>0.395</b> ±0.016 *4.123	<b>0.308</b> ±0.003 *1.011	<b>0.248</b> ±0.002 *0.857
		15	13.81	<b>0.298</b> ±0.009 *3.090	<b>0.387</b> ±0.000 *0.000
950	<b>0.279</b> ±0.007 *2.534			<b>0.344</b> ±0.003 *0.822	<b>0.265</b> ±0.011 *4.269
	25	10.91	<b>0.268</b> ±0.001 *0.264	<b>0.315</b> ±0.006 *1.796	<b>0.247</b> ±0.003 *1.145
750			<b>0.256</b> ±0.000 *0.000	<b>0.274</b> ±0.001 *0.516	<b>0.217</b> ±0.007 *3.259
	35	2.92	<b>0.239</b> ±0.001 *0.296	<b>0.318</b> ±0.006 *1.779	<b>0.289</b> ±0.013 *4.404
200			<b>0.236</b> ±0.001 *0.300	<b>0.287</b> ±0.016 *5.677	<b>0.267</b> ±0.008 *3.178
	45	2.97	<b>0.220</b> ±0.003 *1.286	<b>0.204</b> ±0.002 *1.042	<b>0.318</b> ±0.002 *0.668
200			<b>0.215</b> ±0.001 *0.658	<b>0.192</b> ±0.003 *1.473	<b>0.291</b> ±0.001 *0.243
	55	0.79	<b>0.200</b> ±0.001 *0.354	<b>0.282</b> ±0.004 *1.504	<b>0.282</b> ±0.010 *3.510
50			<b>0.197</b> ±0.001 *0.360	<b>0.268</b> ±0.001 *0.264	<b>0.269</b> ±0.006 *2.103
	65	0.76	<b>0.179</b> ±0.001 *0.790	<b>0.156</b> ±0.004 *2.274	<b>0.152</b> ±0.007 *4.652
50			<b>0.177</b> ±0.001 *0.80	<b>0.150</b> ±0.001 *0.473	<b>0.143</b> ±0.009 *6.451

\*Coeficiente de variación

La viscosidad disminuyó al aplicarse la cizalla constante en todas las temperaturas, lo cual es causado por el acomodo de las fibras de la pulpa y la separación de algunos aglomerados que pudieran existir lo cual causa disminución en la resistencia al flujo. Asimismo, Velázquez y Ordorica (2012) menciona que la temperatura provoca que las moléculas del fluido aumenten su energía cinética, lo cual disminuye las fuerzas de cohesión de las mismas, disminuyendo la viscosidad.

En la pulpa de guayaba con semillas en condiciones de no equilibrio y equilibrio en general la viscosidad aumenta con el incremento de la concentración de semillas de 10 a 20%. En el caso de la pulpa de guayaba con esferas de vidrio la viscosidad disminuye con el incremento de la concentración de 10 a 20%, debido probablemente a que en el caso de las esferas, no es posible que forme interacciones con el agua o con algún componente presente en la pulpa mientras que las semillas su forma irregular puede favorecer algunas interacciones.

En condiciones de equilibrio a la concentración de semillas o esferas de vidrio de 10% la disminución de la viscosidad es similar un 34.09% de 0.44 a 0.15 Pa·s para las semillas y un 46.67% de 0.30 a 0.14 Pa·s para las esferas de vidrio. El incremento de la concentración a un 20% en la pulpa guayaba con esferas la viscosidad disminuye en un 75%, este comportamiento se debe a que la viscosidad de la pulpa estaría dada mayormente por la concentración de las demás componentes propios de la pulpa, así la pulpa con la concentración al 10% de esferas se tiene mayor cantidad de componentes propios de la pulpa, por lo que incrementa la viscosidad (Alvarado, 1993).

Una vez que se alcanzaron condiciones donde la viscosidad es independiente del tiempo se realizó una curva de flujo descendente y ascendente para todas las concentraciones tanto de semillas como de esferas de vidrio. En la Figura 3.6 se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para las temperaturas de 5, 35 y 65°C, que corresponde a la inicial, intermedia y final de las temperaturas estudiadas. Las curvas a 15, 25, 45 y 55 °C se presentan en el Anexo 3. Todas las muestras presentan un comportamiento no newtoniano, la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla es no lineal, tipo adelgazante a la cizalla donde la viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de cizalla (Figura 3.7).

Por el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) mayor a 0.99 el modelo reológico que define a las diferentes concentraciones de pulpa de guayaba con semillas y esferas de vidrio es de Ostwald-de Waele (Cuadro 3.10).

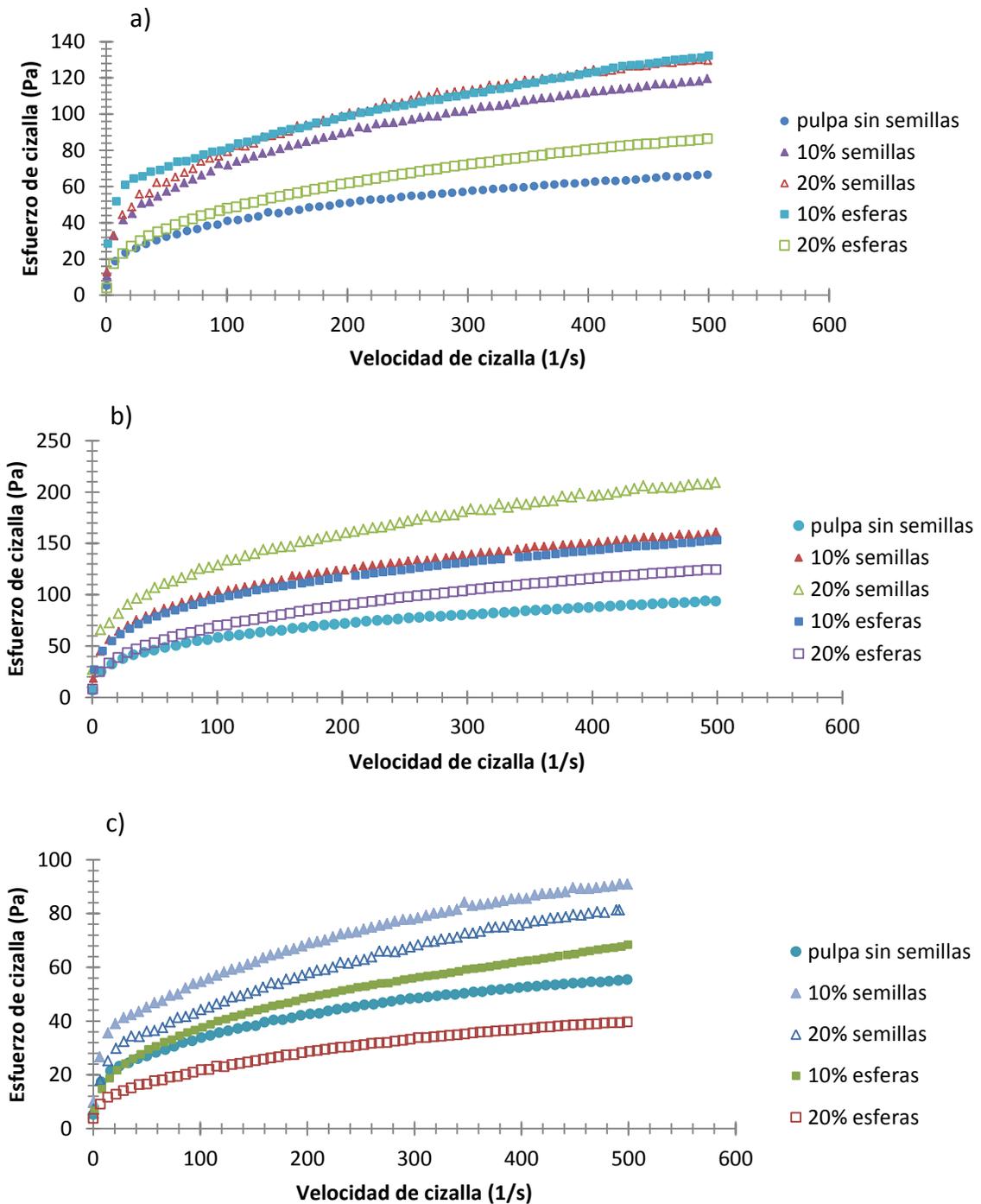


Figura 3.6. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba con diferente concentración de semillas y esferas a diferentes temperaturas. a) 5 °C, b) 35°C y c) 65°C.

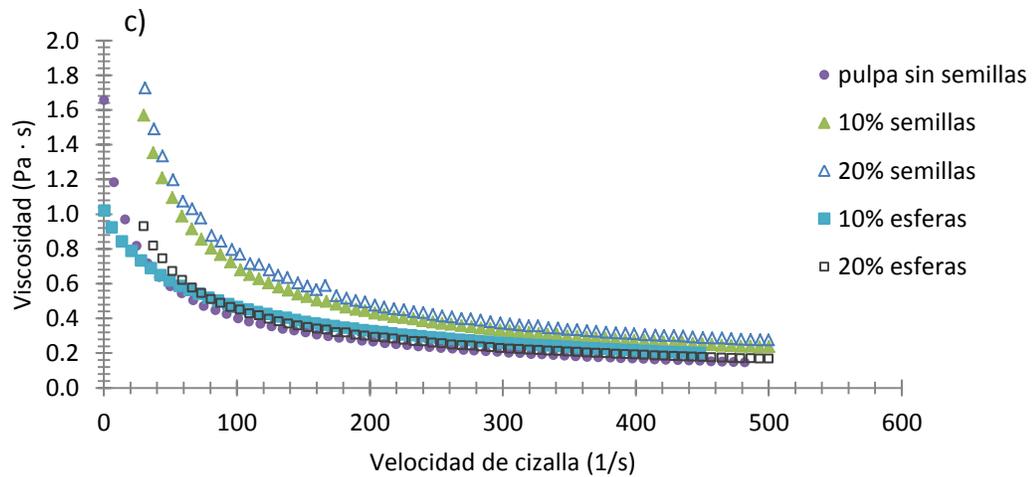
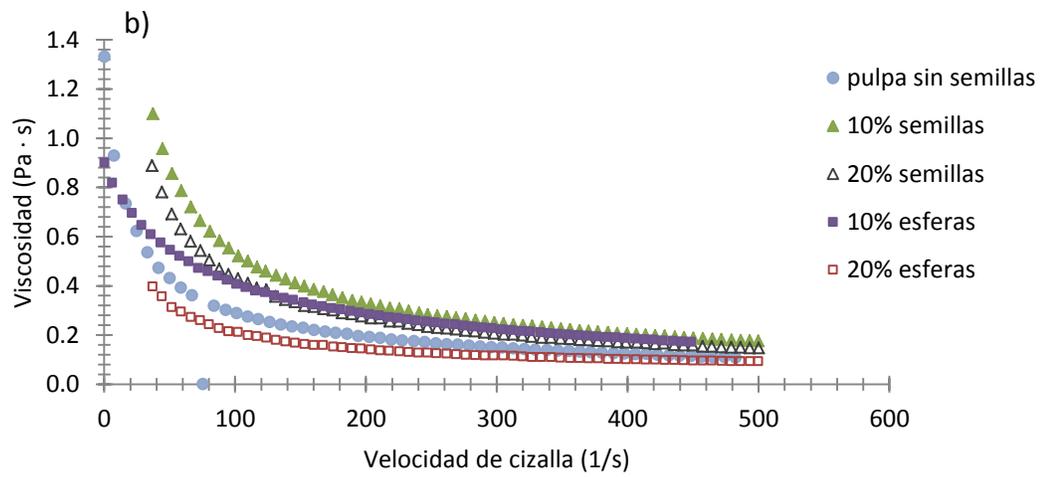
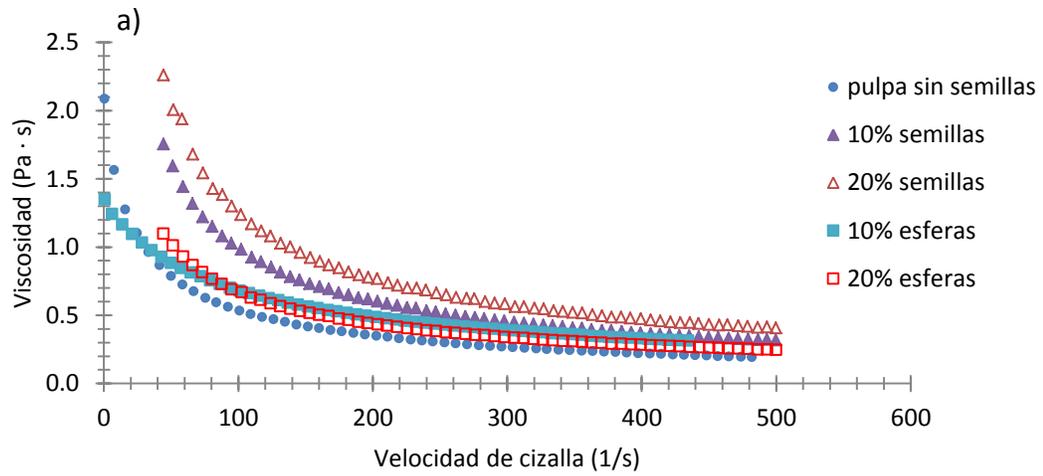


Figura 3.7. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las temperaturas de a)  $5^{\circ}\text{C}$ , b)  $35^{\circ}\text{C}$  y c)  $65^{\circ}\text{C}$ .

Cuadro 3.10. Parámetros reológicos al equilibrio, del modelo Ostwald-de Waele para cada temperatura de la pulpa de guayaba con 10 y 20% de semillas y esferas de vidrio.

T (°C)	10% semillas de guayaba		20% semillas de guayaba		10% esferas de vidrio		20% esferas de vidrio	
	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n
5	<b>25.03</b>	<b>0.3</b>	<b>34.09</b>	<b>0.28</b>	<b>24.9</b>	<b>0.29</b>	<b>11.3</b>	<b>0.39</b>
	± 0.68	± 0	± 1.44	± 0.01	± 1.05	± 0	± 0.31	± 0
	* 2.71	* 0.92	* 4.21	* 3.49	* 4.21	* 1.61	* 2.74	* 0.87
15	<b>20.64</b>	<b>0.32</b>	<b>27.84</b>	<b>0.3</b>	<b>19.19</b>	<b>0.31</b>	<b>8.37</b>	<b>0.39</b>
	± 0.79	± 0	± 2.48	± 0	± 1.16	± 0.01	± 0.1	± 0.02
	* 3.85	* 0.82	* 8.9	* 1.12	* 6.06	* 1.81	* 1.23	* 5.49
25	<b>0.30</b>	<b>0.33</b>	<b>18.89</b>	<b>0.33</b>	<b>15.08</b>	<b>0.33</b>	<b>9.47</b>	<b>0.38</b>
	± 0.01	± 0	± 0.78	± 0	± 0.38	± 0.01	± 0.1	± 0.01
	* 3.09	* 1.18	* 4.11	* 1.06	* 2.55	* 2.07	* 1.01	* 2.58
35	<b>16.17</b>	<b>0.33</b>	<b>18.4</b>	<b>0.32</b>	<b>15.32</b>	<b>0.33</b>	<b>7.27</b>	<b>0.39</b>
	± 0.79	± 0.01	± 0.45	± 0.01	± 0.37	± 0.01	± 0.35	± 0.01
	* 4.89	* 1.77	* 2.47	* 3.79	* 2.42	* 1.76	* 4.77	* 2.09
45	<b>14.98</b>	<b>0.32</b>	<b>16.98</b>	<b>0.33</b>	<b>14.61</b>	<b>0.32</b>	<b>7.35</b>	<b>0.33</b>
	± 0.42	± 0	± 0.74	± 0.01	± 0.4	± 0.01	± 0.62	± 0.03
	* 2.79	* 1.21	* 4.36	* 2.51	* 2.73	* 2.33	* 8.47	* 9.33
55	<b>14.39</b>	<b>0.32</b>	<b>13.12</b>	<b>0.32</b>	<b>14.41</b>	<b>0.31</b>	<b>5.44</b>	<b>0.42</b>
	± 0.81	± 0.01	± 0.49	± 0	± 0.38	± 0.01	± 0.39	± 0.01
	* 5.61	* 2.38	* 3.75	* 1.33	* 2.62	* 1.72	* 7.16	* 1.91
65	<b>13.24</b>	<b>0.3</b>	<b>10.17</b>	<b>0.33</b>	<b>6.71</b>	<b>0.36</b>	<b>3.61</b>	<b>0.37</b>
	± 0.34	± 0.01	± 0.45	± 0.01	± 0.39	± 0.02	± 0.1	± 0.05
	* 2.6	* 1.76	* 4.39	* 3.65	* 5.84	* 4.57	* 2.82	* 12.38

\*Coeficiente de variación.

En el Cuadro 3.10, se presentan los parámetros reológicos del modelo Ostwald-de Waele. Los valores del índice de consistencia ( $k$ ) disminuyeron con el aumento de la temperatura para todas las muestras. En el caso de la pulpa con 10% de semillas la disminución de  $k$  fue de un 52.9% desde la temperatura de 5°C a 65°C y de 70.2% para la concentración de 20% de semillas. En el caso de la pulpa con 20% de semillas este cambio fue mayor debido a que el aumento de la concentración provoca que las interacciones partícula-agua, partícula-partícula de los sólidos propios de la pulpa disminuyan, lo cual induce que los enlaces se rompan y por tanto el índice de consistencia de la pulpa disminuya (Nindo y col., 2005).

En el caso de la pulpa con 10 y 20 % de esferas de vidrio, los valores de del índice de consistencia no presentan una tendencia definida con la temperatura. En la pulpa con 20% de esferas de vidrio sus valores son menores a los del índice de consistencia de la pulpa con 10%, lo cual se puede deber a dos razones a) las esferas de vidrio no pueden interaccionar con otros componentes presentes en la pulpa de guayaba y b) el aumento de la concentración de esferas de vidrio disminuye la concentración de otros componentes presentes en la pulpa responsable del incremento del índice de consistencia.

Para el caso del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), no presenta una tendencia definida con el aumento de la temperatura, ni se ve afectado por el incremento de la concentración de semillas y esferas de vidrio en la pulpa, en promedio presenta un valor cercano a 0.3. Este valor es similar al obtenido para la pulpa de guayaba sin semillas (0.34)

Con los valores de los parámetros reológicos del modelo de Ostwald-de Waele y la ecuación que define a la viscosidad para este modelo, se calculó la viscosidad a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500  $s^{-1}$ ) en la pulpa de guayaba a 10 y 20% de semillas y de esferas de vidrio. Los datos de la viscosidad a 1, 10, 200, 300, 400 y 500  $s^{-1}$  se presentan en el Anexo 4, en el Cuadro 3.8 se presentan para una velocidad de 100  $s^{-1}$ .

Cuadro 3.11. Viscosidad de la pulpa de guayaba sin y con semilla o esferas de vidrio al 10 y 20% a una velocidad de cizalla de  $100 \text{ s}^{-1}$ .

T (°C)	Viscosidad (Pa·s) a $100 \text{ s}^{-1}$				
	Pulpa sin semillas	Pulpa con 10% semillas	Pulpa con 20% semillas	Pulpa con 10% esferas	Pulpa con 20% esferas
5	0.573	0.986	1.227	0.965	0.679
15	0.513	0.914	1.141	0.811	0.587
25	0.414	0.786	0.851	0.709	0.515
35	0.398	0.730	0.834	0.687	0.379
45	0.343	0.657	0.771	0.640	0.475
55	0.339	0.624	0.585	0.593	0.376
65	0.319	0.519	0.457	0.403	0.240

La viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura y velocidad de cizalla (Anexo 4) para todas las concentraciones tanto de semillas como esferas de vidrio. A la temperatura de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  la viscosidad aumenta un 72.1% de la pulpa sin semillas a la pulpa con 10% de semillas y un 68.4% de la pulpa con esferas de vidrio al 10%, pero disminuye con la concentración de 20% de esferas. En el intervalo de temperatura de  $5$  a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  la viscosidad aumenta con el incremento de la concentración de semillas pero en las temperaturas de  $55$  y  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  la viscosidad disminuye con el aumento de la concentración de semillas o esferas ya que al aumentar la temperatura, aumenta la energía cinética de las moléculas provocando un mayor movimiento y con ello una menor viscosidad.

En el caso de la pulpa con esferas de vidrio la viscosidad disminuye con el incremento de la concentración, lo cual indica que las esferas, al existir una mayor cantidad, pueden acomodarse, ofreciendo menor resistencia a fluir.

### 3.4. Relación de la viscosidad con la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de la pulpa de guayaba y pulpa de guayaba con semillas y esferas de vidrio evaluada a diferentes velocidades de cizalla se determinó ajustando la ecuación tipo Arrhenius, realizando una relación del logaritmo natural de la viscosidad y el inverso de la temperatura absoluta. En la Figura 3.8 se muestra esta relación para una velocidad de cizalla de  $100 \text{ s}^{-1}$  en las diferentes concentraciones de semillas y esferas, donde se puede observar una relación lineal, por lo que si se cumple la ecuación de Arrhenius, y por lo tanto se pueden obtener los valores de los componentes de su ecuación, de la pendiente se calculó la energía de activación ( $E_a$ ) si se divide entre la constante de los gases y del antilogaritmo de la ordenada al origen se calcula la viscosidad a un temperatura infinita ( $\eta_\infty$ ).

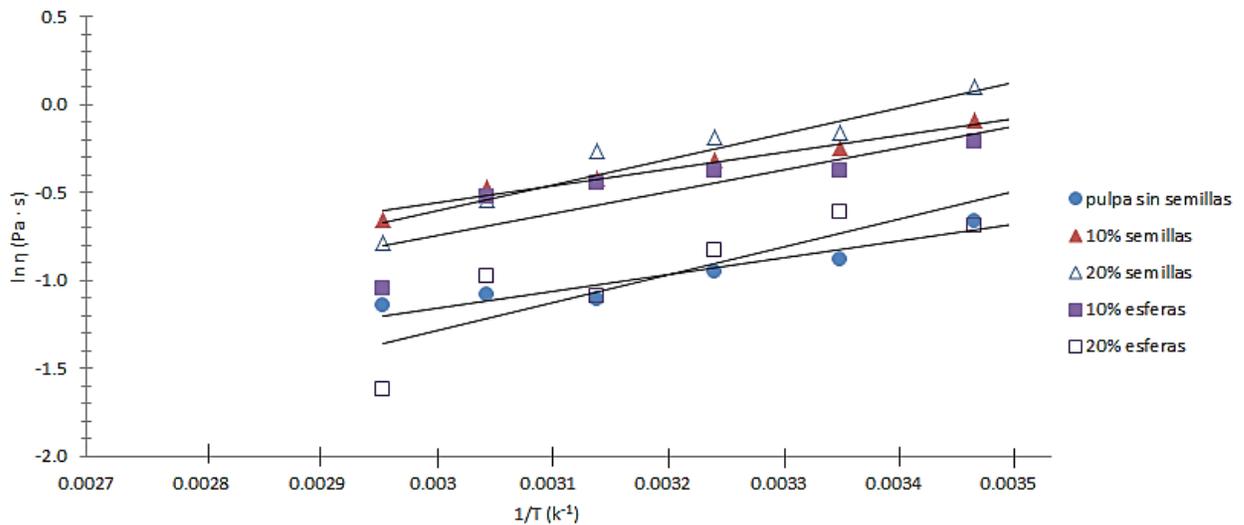


Figura 3.8. Logaritmo natural de la viscosidad a  $100 \text{ s}^{-1}$  en función del inverso de la temperatura para la pulpa de guayaba a las diferentes concentraciones de semillas y esferas.

Los valores de los parámetros de la ecuación de Arrhenius para la pulpa de guayaba sin y con semillas o esferas se muestran en el Cuadro 3.12.

Cuadro 3.12. Parámetros del modelo de Arrhenius.

Muestra	$E_a$ (kJ/gmol)	$\eta_\infty$ (Pa·s)	$r^2$
<b>Pulpa sin semilla</b>	7.956	0.0178	0.9409
<b>Pulpa con 10% semillas</b>	7.992	0.0318	0.9788
<b>Pulpa con 20% semillas</b>	12.114	0.0069	0.9376
<b>Pulpa con 10% esferas</b>	10.272	0.0116	0.8098
<b>Pulpa con 20% esferas</b>	13.139	0.0024	0.8259

Como se observa en el Cuadro 3.12 la energía de activación ( $E_a$ ) va aumentando conforme aumenta la concentración tanto de semillas como de esferas de vidrio mientras que la  $\eta_\infty$  a la temperatura infinita disminuye con el aumento de la concentración de semillas o esferas.

$E_a$  es mayor en la pulpa con esferas de vidrio en donde la viscosidad resultó ser menor, esto se puede deber a que la pulpa con esferas de vidrio es más sensible a la temperatura (Coe y Cui, 2003) por lo que grandes valores de la energía de activación indican que la viscosidad disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura (Steffe, 1996).

El cálculo de la energía de activación también se efectuó en condiciones de no equilibrio, seleccionando la viscosidad reportada por el software del equipo de la primera curva de flujo de ascenso a una velocidad de cizalla de  $10 \text{ s}^{-1}$  y  $500 \text{ s}^{-1}$  la segunda condición de no equilibrio se determinó al primer tiempo reportada por el software del equipo de la curva de cizallamiento constante a  $500 \text{ s}^{-1}$ . Para el caso de las condiciones de equilibrio se selecciona la viscosidad medida por el software del equipo al tiempo final de la curva de cizallamiento constante ( $500 \text{ s}^{-1}$ ) que es el momento en la cual la viscosidad permaneció independiente del tiempo y la viscosidad calculada a partir de los parámetros reológicos del modelo de Oswald-de Waele a una velocidad de cizalla de  $10$  y  $500 \text{ s}^{-1}$ .

Los resultados son expresados en el Cuadro 3.13, donde además se presenta el valor de la constante de Arrhenius y el índice de determinación para cada caso.

Cuadro 3.13. Parámetros del modelo de Arrhenius en la pulpa de guayaba con y sin semillas o esferas de vidrio en las condiciones de no equilibrio y equilibrio.

Muestra	Condiciones de no equilibrio								
	Cizallamiento constante (500 s <sup>-1</sup> ) al primer tiempo			Primera curva de flujo de ascenso a la velocidad de cizalla de 10 s <sup>-1</sup>			Primera curva de flujo de ascenso de velocidad de cizalla a 500 s <sup>-1</sup>		
	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>
<b>Pulpa sin semillas</b>	10.5	0.002	0.978	12.840	0.014	0.950	10.3	0.003	0.974
<b>10% de semillas</b>	8.5	0.009	0.989	12.838	0.027	0.948	8.5	0.009	0.988
<b>20% de semillas</b>	11.851	0.003	0.793	13.118	0.026	0.884	11.9	0.003	0.792
<b>10% de esferas</b>	10.224	0.004	0.897	9.086	0.126	0.821	11.416	0.003	0.848
<b>20% de esferas</b>	13.248	0.001	0.972	14.625	0.008	0.834	12.908	0.001	0.889
Pulpa	Condiciones de equilibrio								
	Cizallamiento constante (500 s <sup>-1</sup> ) al tiempo final			Parámetros reológicos de la curva de descenso a 10 s <sup>-1</sup>			Parámetros reológicos de la curva de descenso a 500 s <sup>-1</sup>		
	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>	Ea (kJ/g mol)	$\eta_{\infty}$ (Pa·s)	r <sup>2</sup>
<b>Sin semillas</b>	8.399	0.005	0.944	7.232	0.109	0.893	8.5	0.005	0.963
<b>10% de semillas</b>	7.230	0.014	0.996	7.936	0.157	0.986	8.0	0.010	0.953
<b>20% de semillas</b>	13.071	0.001	0.995	13.382	0.020	0.954	11.2	0.003	0.916
<b>10% de esferas</b>	9.161	0.006	0.806	11.405	0.036	0.776	9.480	0.005	0.835
<b>20% de esferas</b>	10.785	0.002	0.906	12.806	0.011	0.850	13.372	0.001	0.789

La energía de activación (***Ea***) aumenta con el incremento de la concentración de semillas o esferas de vidrio tanto en condiciones de no equilibrio como de equilibrio. En el caso de las condiciones de equilibrio la pulpa de guayaba sin semilla presenta menores valores de la ***Ea***. En la pulpa de guayaba con semillas a las condiciones de equilibrio y no equilibrio, a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$ , la ***Ea*** no se ve afectada sus valores son similares (8.0 y 8.5 KJ/gmol) debido a que a altas velocidades de cizalla la forma irregular de las semillas, podrían no alinearse a la cizalla debido a la presencia de interacciones partícula-partícula presentando mayor resistencia a fluir.

En la pulpa de guayaba con esferas de vidrio, la ***Ea*** no presenta una tendencia definida, el caso de las condiciones de no equilibrio la mayor diferencia se tiene cuando se evalúa a una velocidad de cizalla de  $10 \text{ s}^{-1}$  y en las condiciones de equilibrio la mayor diferencia se presenta cuando se evalúa a  $500 \text{ s}^{-1}$ . Las pulpa con la concentración de 20% de esferas presentaron menores valores de viscosidad (Cuadro 3.9), índice de consistencia (Cuadro 3.10) y viscosidad (Cuadro 3.11) muestran los mayores valores de la ***Ea*** tanto en condiciones de no equilibrio como de equilibrio, por lo que se puede inferir que en esta muestra hay un mayor movimiento de las partículas (Chiralt y col., 1991) y la geometría definida lo que permite el acomodo de las partículas al flujo (Windhab, 1995).

## CONCLUSIONES

Las pulpas de guayaba sin semillas, con semillas y con esferas de vidrio tienen un comportamiento dependiente del tiempo y en condiciones de equilibrio los datos experimentales se ajustaron al modelo de Ostwald-de Waele tipo adelgazante a la cizalla.

En todas las muestras el índice de consistencia disminuyó con el aumento de la temperatura y el índice de comportamiento no se vio afectado por la temperatura con un valor cercano a 0.3 en todas las suspensiones.

La viscosidad de la pulpa de guayaba con esferas de vidrio fue menor a la pulpa con semillas, debido a que las esferas presentan una forma definida, acomodándose al flujo y la no interacción con otros componentes de la pulpa.

En la pulpa de guayaba con y sin semillas la energía de activación fue menor en las condiciones de equilibrio, debido a que a altas velocidades de cizalla la forma irregular de las semillas podrían no alinearse a la cizalla presentando mayor resistencia a fluir.

La energía de activación fue mayor en la pulpa de guayaba con esferas de vidrio debido a que es más susceptible a los cambios de temperatura debido a su menor viscosidad.

La energía de activación en la pulpa de guayaba con semillas al 10% y 20 % evaluadas a  $500 \text{ s}^{-1}$  no fueron afectadas por las condiciones de equilibrio o no equilibrio con un valor entre 8.0 a 11.2 KJ/gmol.

## REFERENCIAS

- Alvarado J. (1993). Viscosidad y energía de activación de jugos filtrados. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de alimentos*, 33: 87-93.
- Amaya V., Suárez A. (2012). Fluidos no newtonianos. XXIII Congreso de investigación CUAM- ACMor.
- Aranceta J., Pérez-Rodrigo C. Maduración de la fruta. 2006. Masson. España.
- Atkins P., Jones L. (2007). Principios de química: Los caminos del descubrimiento. España: Médica Panamericana S.A.
- Avilán R., Bautista D. (1989). Manual de fruticultura. Caracas, Venezuela: América C.A.
- Badui S. (1990). Química de los alimentos. 2° Ed. México: Alhambra Mexicana. S.A. de C.V.
- Barnes H., Hutton J., Walters K. (1989). An-Introduction of rheology. Países bajos: Elsevier Science Publishers B.V.
- Barnes H. (2000). A handbook of elementary rheology. Reino Unido: Cambrian Printers.
- Bayod E., Tornberg E.(2011). Microstructure of highly concentrated tomato suspensions on homogenisation and subsequent shearing. *Food Research International*, 44: 755–764.
- Betalleluz I., Velezmoro C. (2001). Predicción del punto inicial de congelación de jugos de granada (*Punica Granatum L.*), granadilla (*Passiflora nítida H.B.K*), sandía (*Citrullus lanatus*) y uva (*Vitis vinífera*). UNALM Anales científicos, 49: 39-55.
- Billmeyer F. (2004). Ciencia de los polímeros. España: Reverté.
- Boatella J., Codoni R., López P. (2004). Química y bioquímica de los alimentos. España: Publicaciones y ediciones de la Universidad de Barcelona.
- Castellan W. (1987). Fisicoquímica. México: Pearson educación.
- Chang Yi-H., Hartel R. W. (1997). Flow properties of freeze-concentrated skim milk. *Journal of Food Engineering*, 31, 375-386.

- Chiralt A, Galotto M.J., Fito P. (1991). Changes in rheological properties and particle-size distribution during the manufacture of “Xixona turrón”. *Journal of Food Engineering*, 14: 117-128.
- Coe, D. S., Cui, Z. H. (2003). Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos. XII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, Quito (Ecuador).
- Cubero N., Monferrer A., Villalta J. (2002). Aditivos alimentarios. España, Madrid: Grupo Mundi Prensa.
- Dak, M., Verma, R., Jaaffrey, S. (2007). Effect of temperature and concentration on Rheological properties of “Kesar” mango juice. *Journal of Food Engineering*, 80: 1011-1015.
- Den Ouden F. W., Van Vliet T. (1997). Particle size distribution on tomato concentrates and effects on rheological properties. *Journal of Food Science*, 62: 565–567
- García M. (2004). Guía práctica para el curso resistencia de materiales 1. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Garriga A. (2002). Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo. Tesis de doctorado. Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- Garza G. (1999). Caracterización reológica y microbiológica, y cinéticas de deterioro en cromogenado de melocotón. Tesis de doctorado. Universitat de Lleida, Cataluña, España.
- Genovese D. B., Rao M. A., Lozano J. E. (2007). The rheology of colloidal and noncolloidal food dispersions. *Journal of Food Science*. 72: 11-20.
- Géosta M., López A. (2003). Manual de industrias lácteas. España: Mundi-Prensa libros.
- González V. (1996). Física fundamental. México: Progreso S. A. de C. V.
- Goodwin J., Hughes R. (2000). Rheology for chemist on introduction. UK: Royal Society of Chemistry.

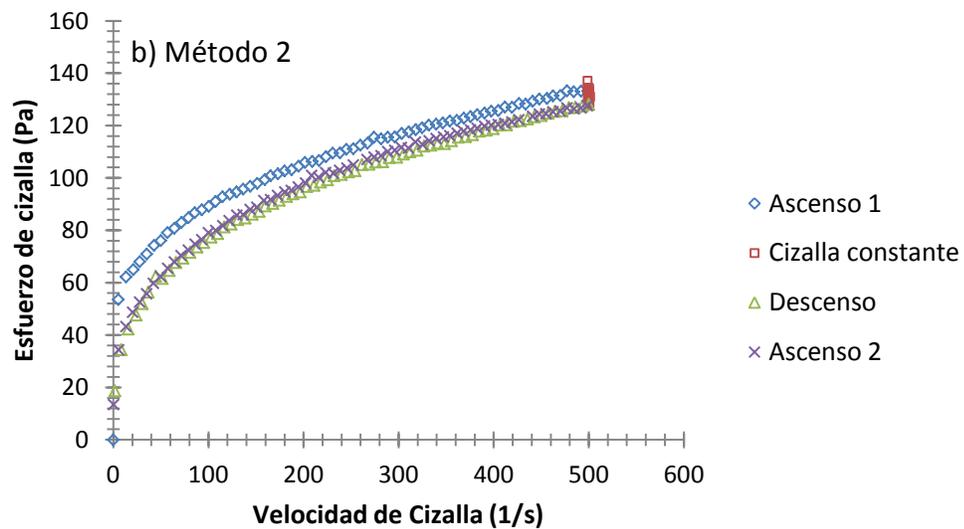
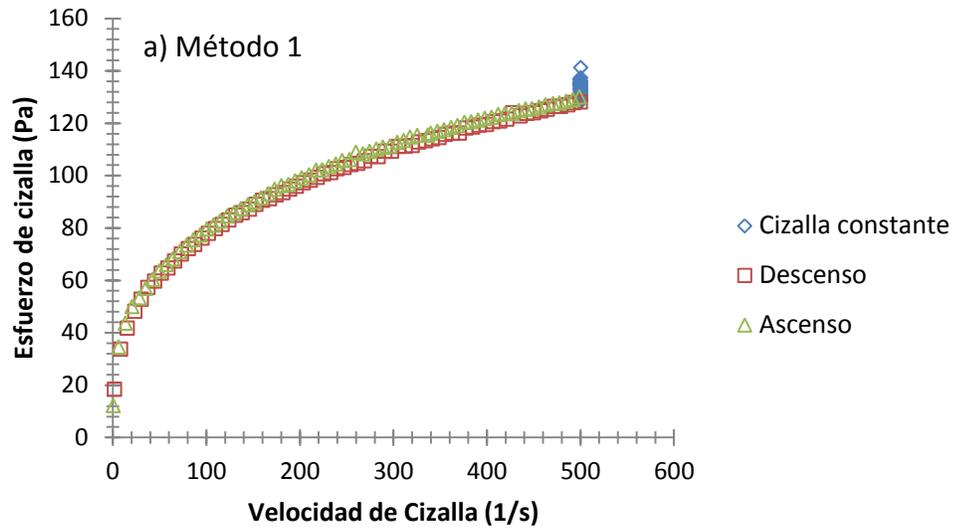
- Hibbeler R. C. (2006). Mecánica de materiales. 6ª Ed. México: Pearson Educación de México, S. A. de C. V.
- Ibarz, A., Barbosa-Cánovas, G.(2003). Unit operations in food engineering. E.U.A.: CRC Press.
- Jonasz M., Fournier G. (2007). Light scattering by particles in water theoretical and experimental foundations. Oxford, Academic
- Laguado, N., Briceño, R., Marín M., Esparza D., De Moreno L.A., Mora D., Ferrer H. (1995). Efecto de la fertilización y del estado de madurez sobre la calidad de frutos de guayaba (*Psidium guajava. L.*). *Revista Facultad Agronomía*, 12: 437-449.
- Levitt B. P. (1979). Física practica de Findlay, 9 Ed. España: Reverté.
- Lopez-Sanchez P., Nijse J., Blonk H. C. G., Bialek L., Schumm S., Langton M. (2010). Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91: 207-217.
- Lozano J. E., Ibarz A. (1994). Thixotropic behaviour of concentrated fruit pulps. *LWT Food Technology*, 27: 16-18.
- Martínez-Padilla (2012). Food suspensions In Food Engineering. Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO publishing. Francia: 323-338.
- Martins V., Kawazoe A., Barbosa G., Dacanal G., Ciro- Velázquez H., Lopes R. (2010). The effect of homogenisation on the stability of pineapple pulp. *International Journal of Food Science and Technology*, 45: 2127-2133.
- Moreno R. (2005). Reología de suspensiones cerámicas, España, Libros electrónicos.
- Nindo C.I., Tang J., Powers J.R., Thakar P.S. (2005). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *Food Science and Technology* 40: 292-299.

- NMX-F-428-1982. Determinación de humedad (Método rápido de la termobalanza), México.
- Noriega (2010). Manual del medidor de pH Conductronic. Modelo 20.
- Pelegrine G. D. H., Gasparetto C. A. (2002). Rheological behavior of pineapple and mango pulps. *LWT Food Technology*, 35: 645-648.
- Pérez L., Garcell L. (2011). Análisis del efecto de las principales variables que determinan el comportamiento reológico de suspensiones limoníticas. *Tecnología Química*, 31: 106-118.
- Quintáns, R. L. (2011). Reología de productos alimentarios. Tesis doctoral. Universidad Santiago, Chile.
- Ramírez-Navas J.S. (2006). Introducción a la Reología de los alimentos. Colombia: Universidad del Valle.
- Rodríguez M. (2009). Estructura y propiedades de los polímeros. Recuperado el 6 de marzo del 2013, de <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf>
- Salazar R. (2012). Procesamiento y conservación de frutas, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez C., Oria R., Sánchez-Gimeno A. C. (2006). Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium Guajaba L.*). Simposio Poscosecha, España: 309- 316.
- Saravacos G.D. (1970). Effect of Temperature on Viscosity of Fruit Juices and Purees. *Journal of Food Science*, 35:122-125,
- Sato A., Cunha R. (2009). Effect of particle size on rheological properties of jaboticaba pulp. *Journal of Food Engineering*, 91: 566-570.
- Shamsudin R, Rou, S., Mandreal P. (2007). Influence of temperature and soluble solid contents on rheological properties of the josapine variety of pineapple fruit (*Ananas comosus L.*). *International Journal of Engineering and Technology*, 12: 213-220.

- Sharma S.K., LeMaguer M., Liptay A., Poysa V. (1996). Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. *Food Research International*, 29: 175-179.
- Steffe J. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2° Ed. U.S.A.: Freeman press.
- Tanglertpaibul T., Rao M. A. (1987). Flow properties of tomato concentrates: effect of serum viscosity and pulp content. *Journal of Food Science*, 52: 318–321
- Tsai S. C., Zammouri K. (1988). Role of interparticular van der Waals force in rheology of concentrated suspensions. *Journal Rheology*, 32: 737- 750.
- Tung M., Paulson, A. (1995). *Rheological concepts for probing ingredient interactions in food systems*. New York, USA: En Gaonkar.
- Velázquez M. L., Ordorica M. A. Suspensiones. Revisado el 23 de febrero del 2012 desde Internet <http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad22.pdf>
- Vila J. J. L. (1997). *Tecnología farmacéutica 1: Aspectos fundamentales de los sistemas farmacéuticos y operaciones básicas*. España: Síntesis.
- Vitali A. A., Rao M. A. (1982). Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. *J. Texture Studies*, 13: 275- 289.
- Wilson Ch. W., Shaw P.E., Campbell C.W. (1982). Determination of organic acids and sugars in guava (*Psidium guajava L.*) cultivars by high-performance liquid chromatography. *Journal Science Food and Agriculture*, 33: 777 - 780.
- Windhab E.J. (1995). *Rheology in food processing*. Londres: Beckett, S.T.
- Zainal B. S., Rahman R. A., Ari, A. B., Saari, B. N., Asbi, B. A. (2000). Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. *Journal of Food Engineering*, 43: 55-59.
- Zhou Z., Scales P. J., Boger D. V. (2001). Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions. *Chemical Engineering Science*, 56: 2901-2920.

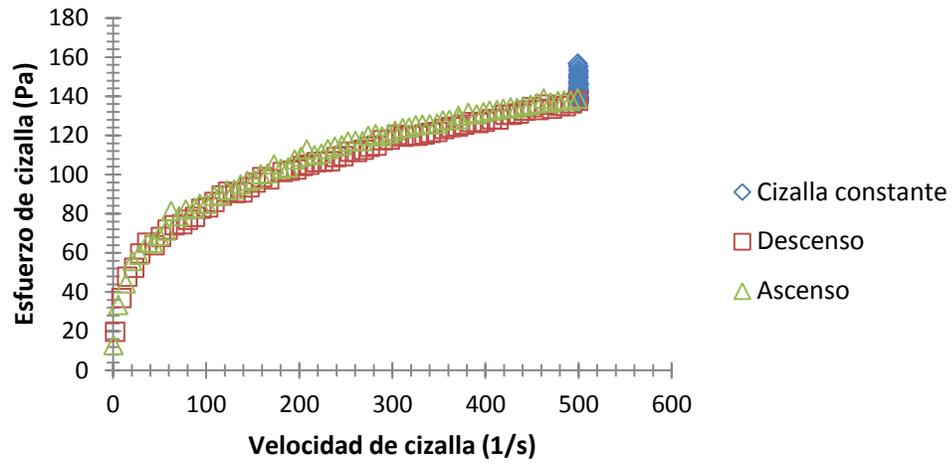
# ANEXOS

# ANEXO 1

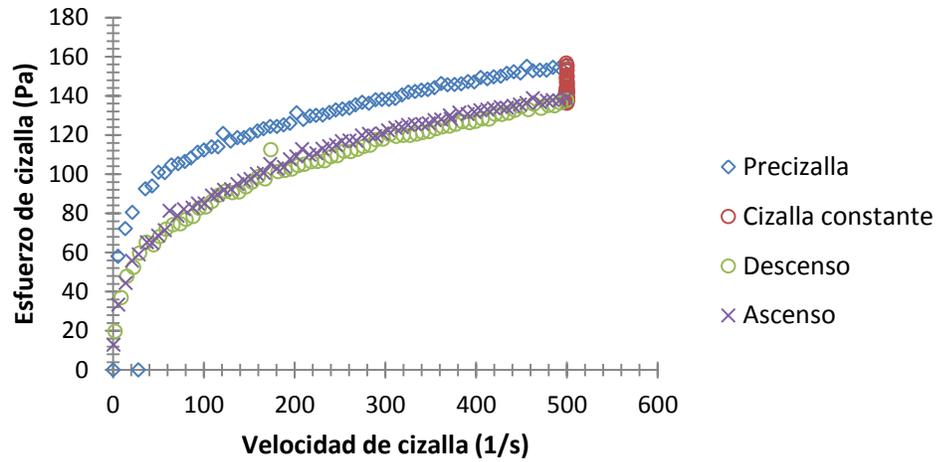


Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba con 10% de semillas a 25°C, para a) Método 1 y b) Método 2.

a) Método 1

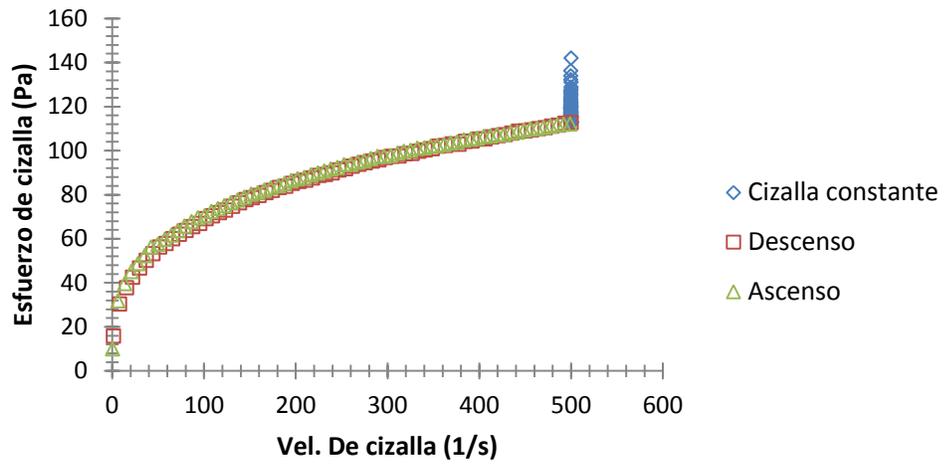


b) Método 2

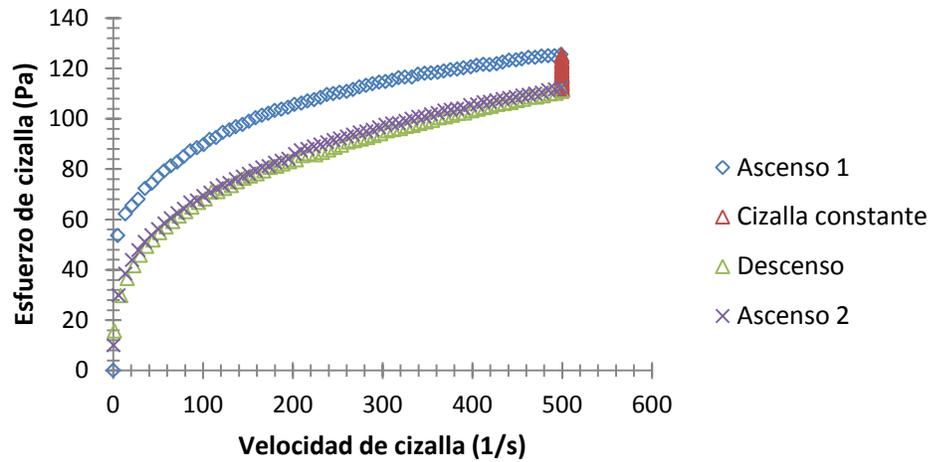


Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba con 20% de semillas a 25°C, para a) Método 1 y b) Método 2.

### a) Método 1

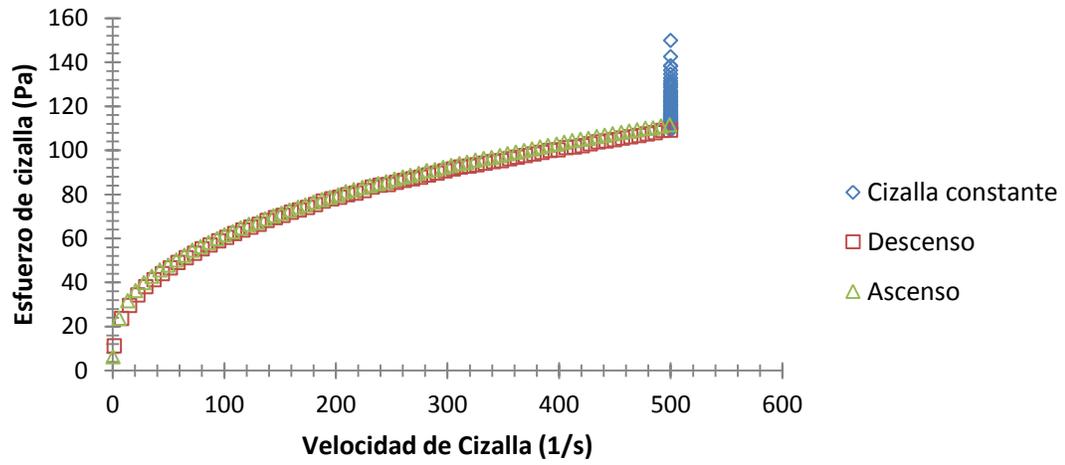


### b) Método 2

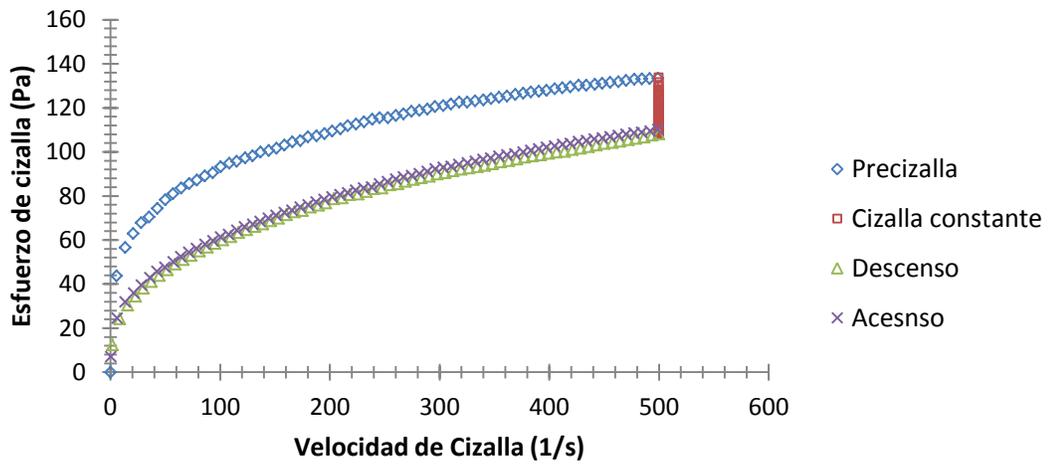


Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba con 10% de esferas a 25°C, para a) Método 1 y b) Método 2.

### a) Método 1

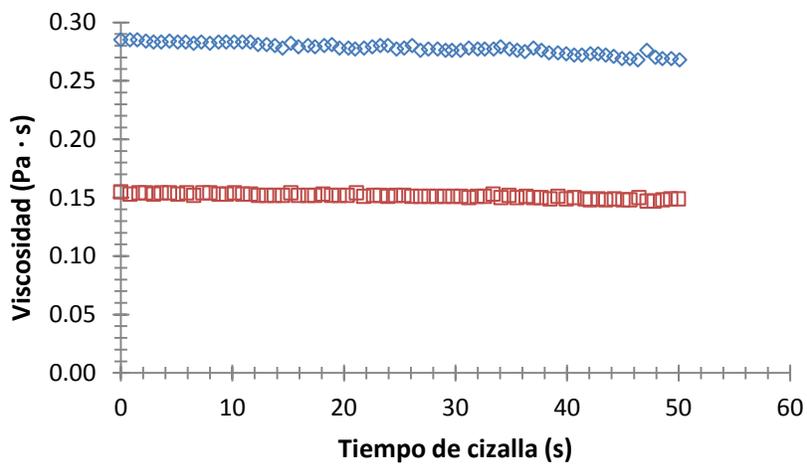
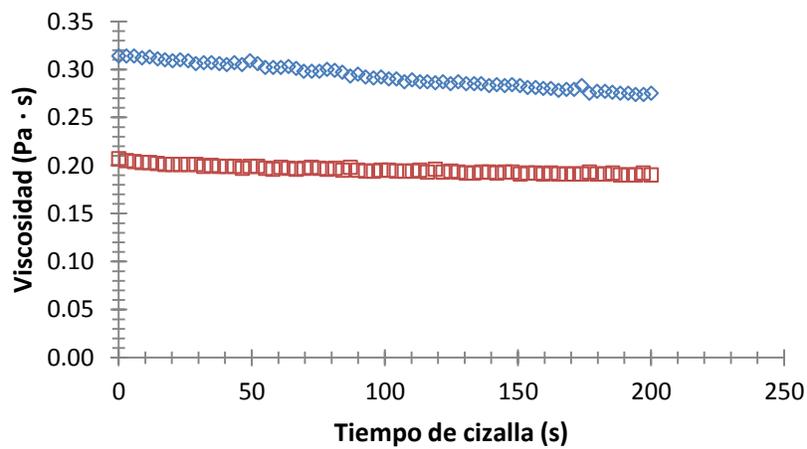
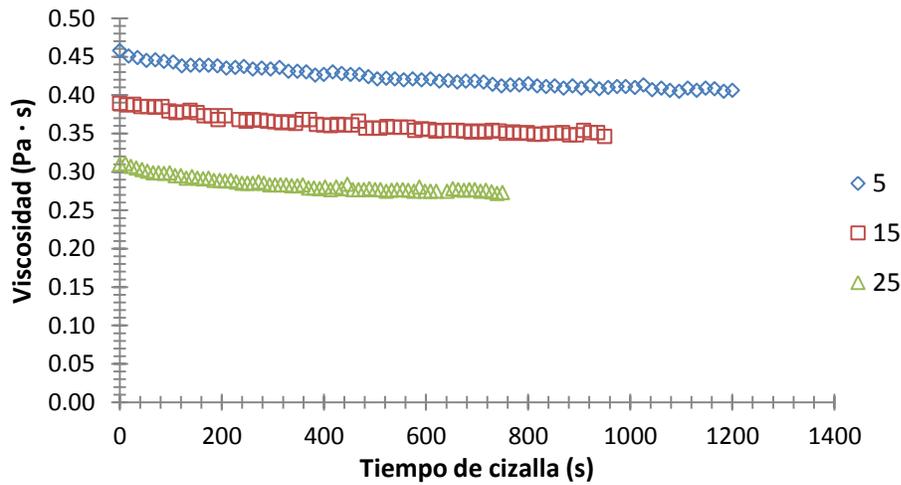


### b) Método 2

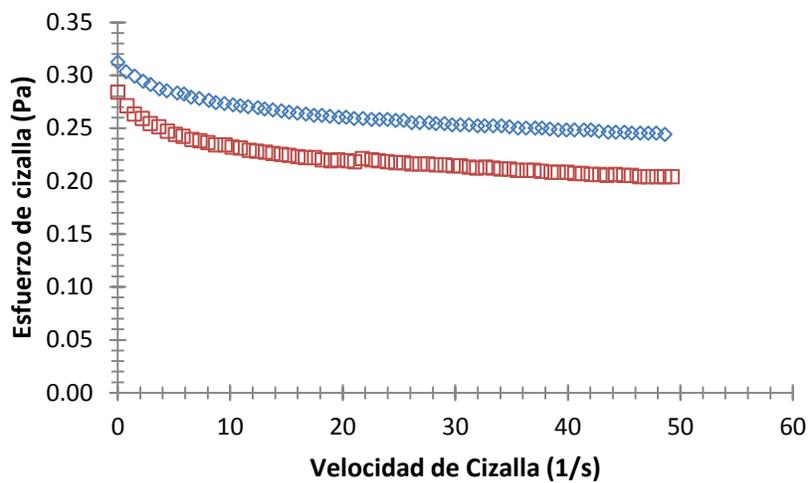
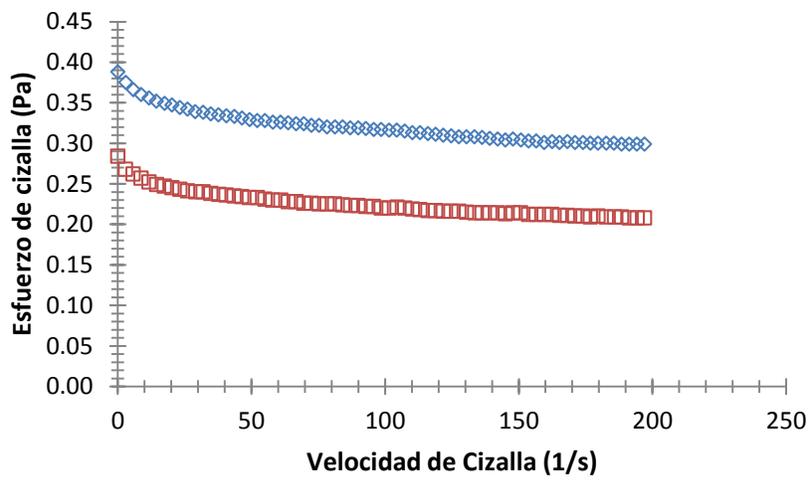
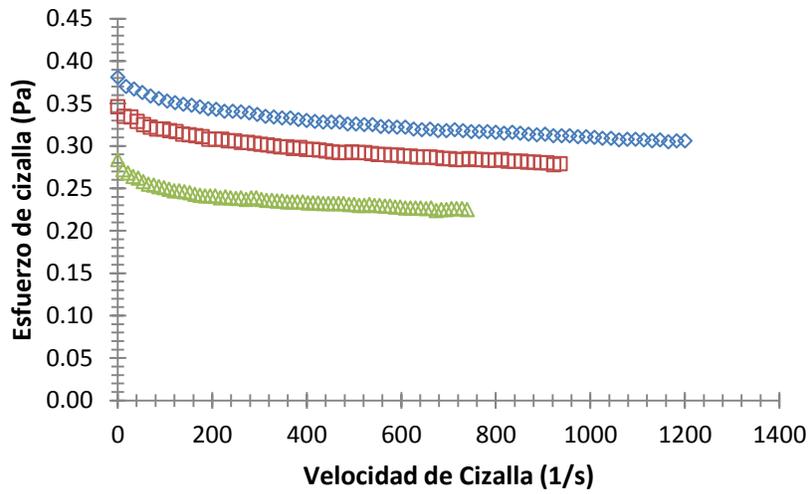


Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de guayaba con 20% de esferas a 25°C, para a) Método 1 y b) Método 2.

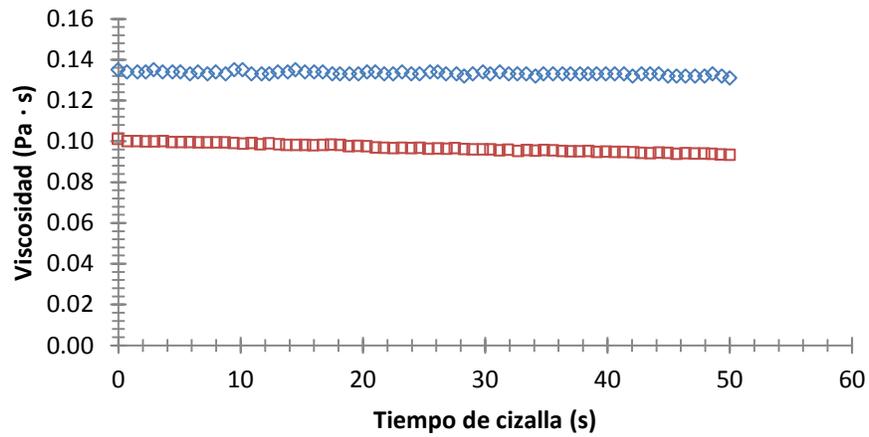
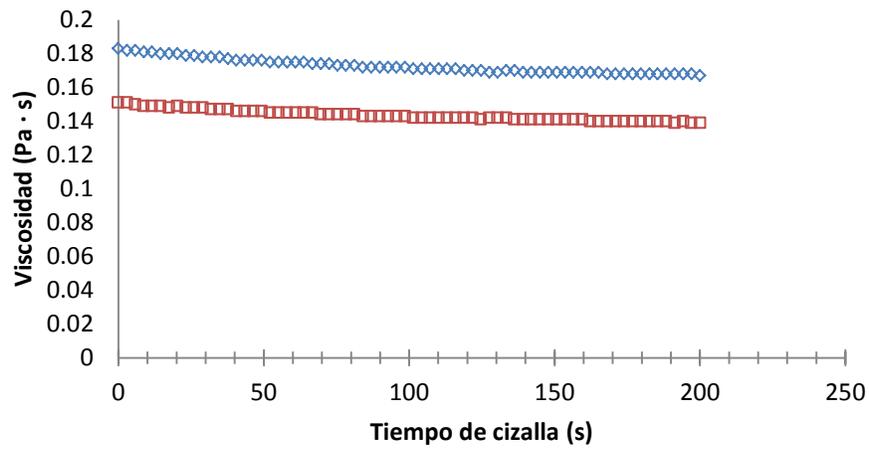
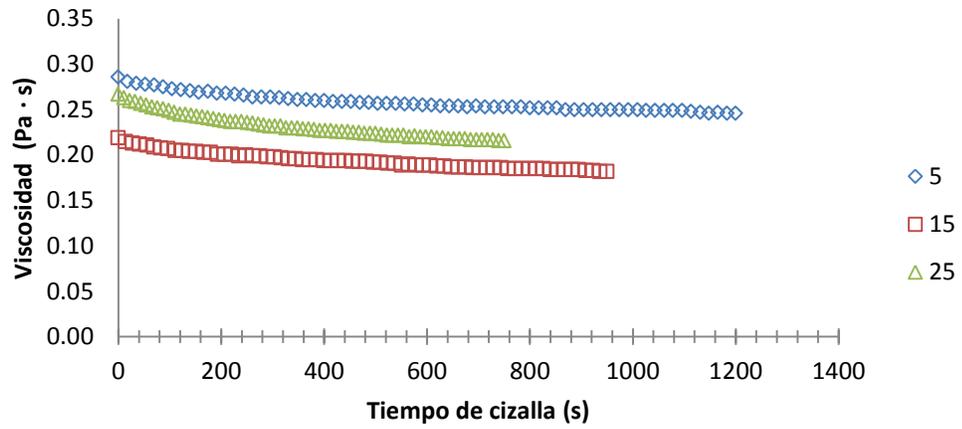
## ANEXO 2



Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$  para la pulpa de guayaba con 20% de semillas.

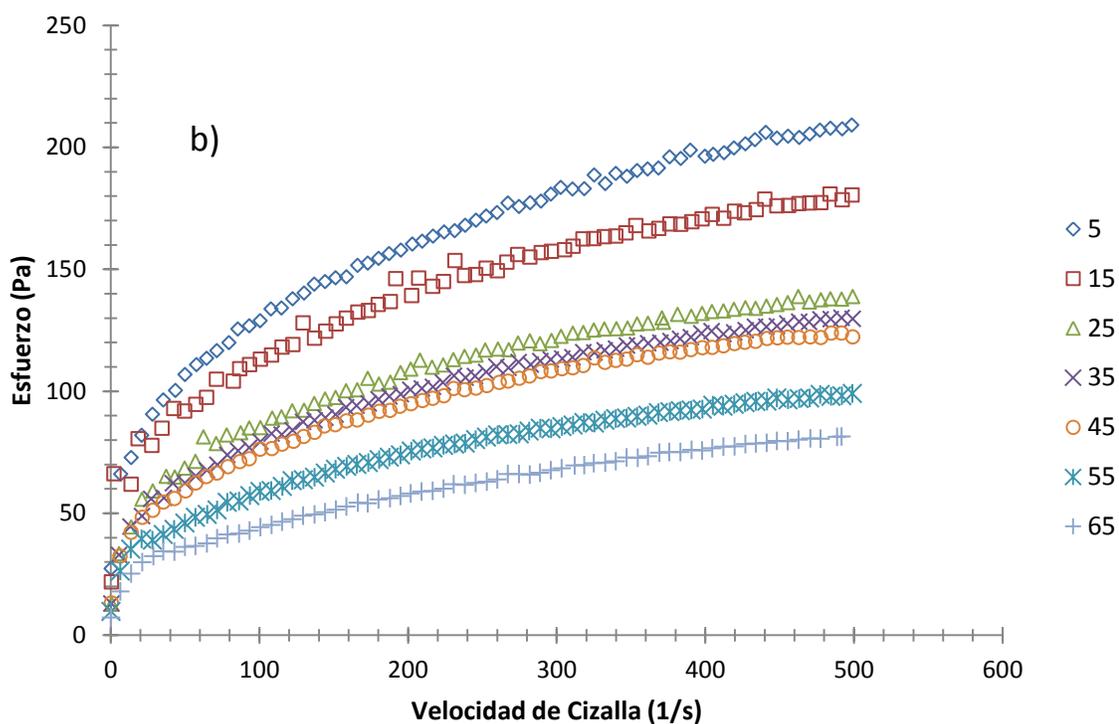
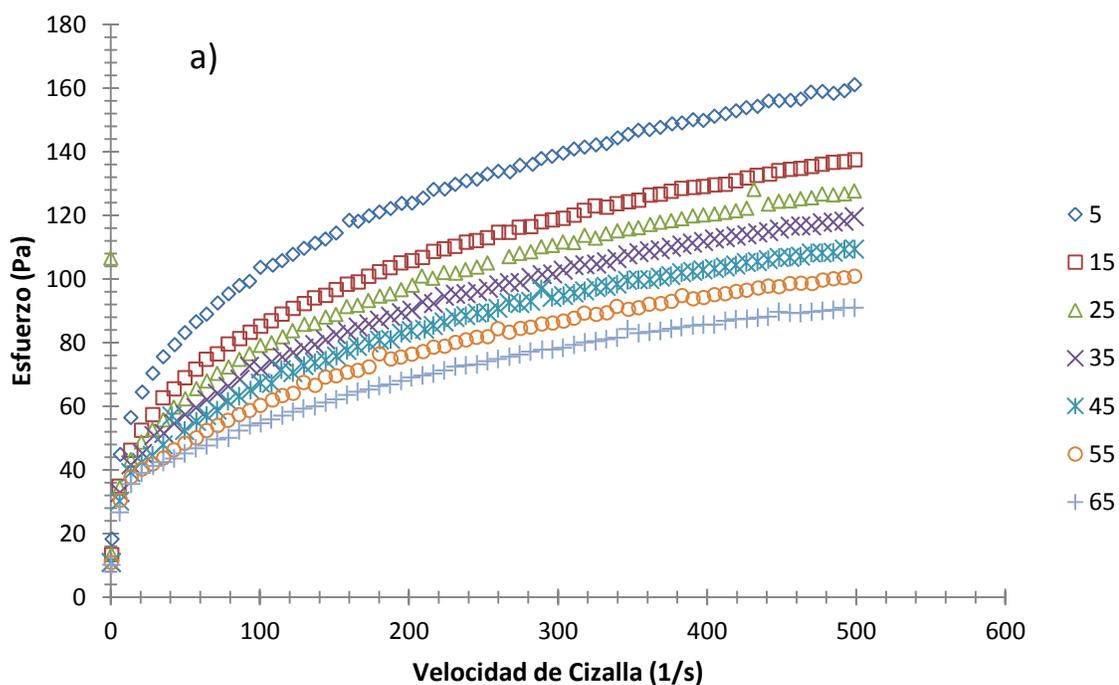


Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$  para la pulpa de guayaba con 10% de esferas.

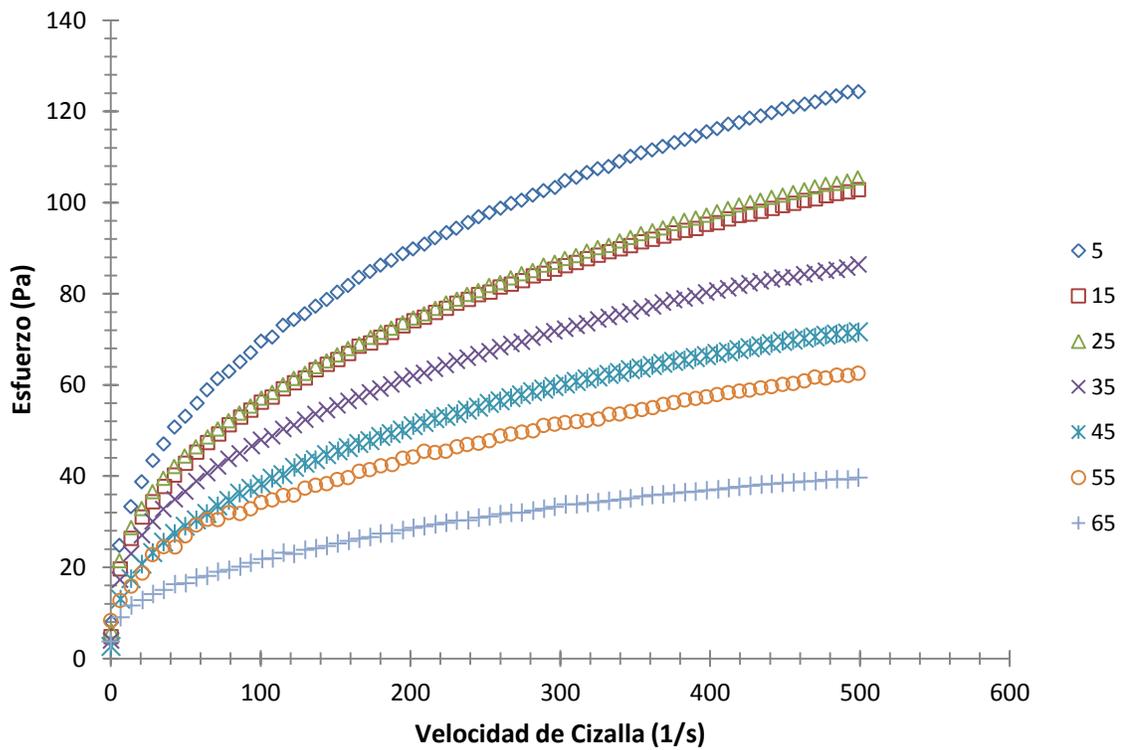
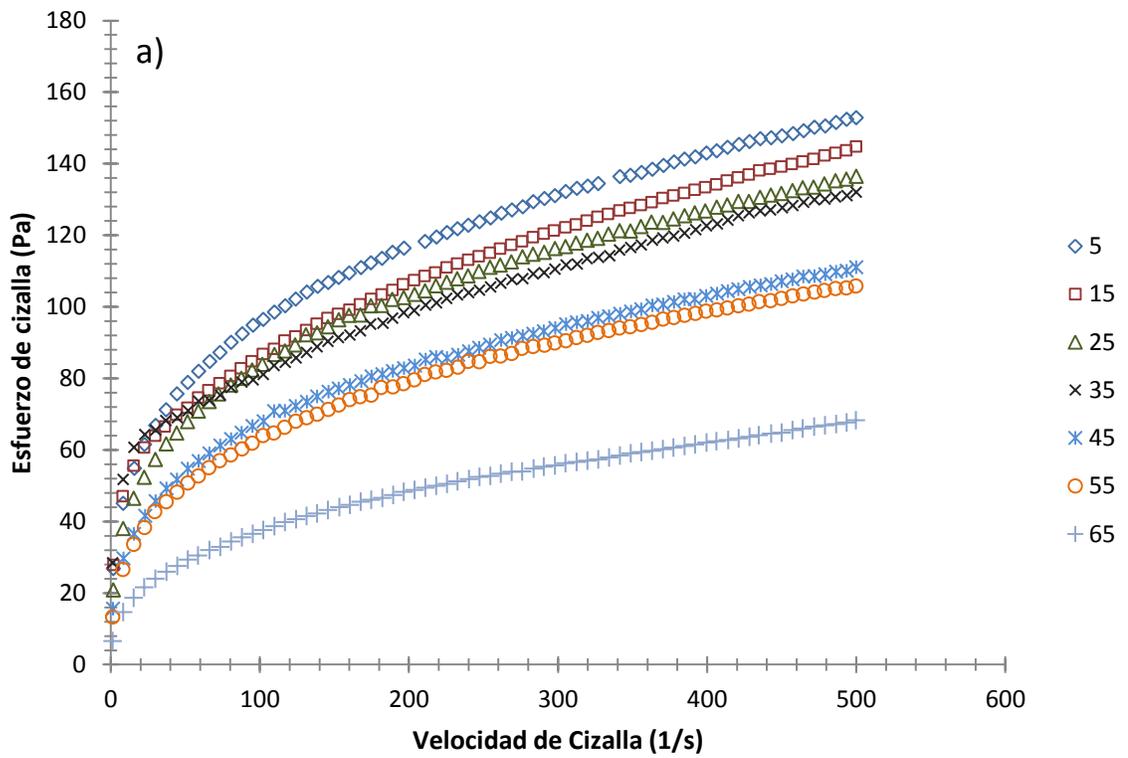


Viscosidad en función al tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla de  $500 \text{ s}^{-1}$  para la pulpa de guayaba con 20% de esferas.

### ANEXO 3



Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa con a) 10% y b) 20% de semillas de guayaba a las diferentes temperaturas estudiadas.



Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para la pulpa con a) 10% y b) 20% de esferas de vidrio a las diferentes temperaturas estudiadas.

## ANEXO 4

Viscosidad a diferentes velocidades de cizalla de la pulpa de guayaba sin semillas.

T (°C)	Viscosidad (Pa · s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	11.903	2.612	0.573	0.363	0.278	0.230	0.199
15	10.831	2.358	0.513	0.324	0.248	0.205	0.177
25	8.487	1.874	0.414	0.263	0.201	0.167	0.144
35	8.190	1.806	0.398	0.253	0.193	0.160	0.138
45	7.725	1.627	0.343	0.214	0.163	0.134	0.115
55	8.119	1.660	0.339	0.210	0.159	0.131	0.112
65	7.683	1.566	0.319	0.198	0.149	0.122	0.105

Viscosidad a diferentes velocidades de cizalla de pulpa de guayaba con 10% de semillas.

T (°C)	Viscosidad (Pa · s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	25.025	4.967	0.986	0.606	0.456	0.372	0.318
15	20.644	4.343	0.914	0.572	0.434	0.358	0.307
25	17.483	3.706	0.786	0.493	0.375	0.309	0.266
35	16.174	3.437	0.730	0.458	0.349	0.287	0.247
45	14.985	3.138	0.657	0.411	0.312	0.256	0.220
55	14.392	2.996	0.624	0.389	0.295	0.243	0.208
65	13.239	2.621	0.519	0.319	0.240	0.196	0.167

Viscosidad a diferentes velocidades de cizalla de pulpa de guayaba con 20% de semillas.

T (°C)	Viscosidad (Pa · s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	32.038	6.271	1.227	0.751	0.564	0.460	0.393
15	29.149	5.767	1.141	0.700	0.527	0.430	0.368
25	18.892	4.010	0.851	0.534	0.406	0.335	0.288
35	18.400	3.917	0.834	0.523	0.399	0.329	0.283
45	16.981	3.619	0.771	0.484	0.369	0.304	0.262
55	13.120	2.770	0.585	0.366	0.278	0.229	0.197
65	10.170	2.155	0.457	0.286	0.218	0.179	0.154

Viscosidad a diferentes velocidades de cizalla de pulpa de guayaba con 10% de esferas de vidrio.

T (°C)	Viscosidad (Pa · s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	24.895	4.901	0.965	0.591	0.444	0.363	0.310
15	19.189	3.946	0.811	0.504	0.382	0.313	0.269
25	15.606	3.327	0.709	0.445	0.339	0.280	0.241
35	15.323	3.245	0.687	0.431	0.328	0.270	0.232
45	14.615	3.058	0.640	0.400	0.303	0.250	0.214
55	14.412	2.923	0.593	0.367	0.277	0.227	0.194
65	7.613	1.753	0.403	0.259	0.200	0.167	0.145

Viscosidad a diferentes velocidades de cizalla de pulpa de guayaba con 20% de esferas de vidrio.

T (°C)	Viscosidad (Pa · s)						
	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>	300 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
5	11.295	2.769	0.679	0.445	0.347	0.291	0.254
15	10.186	2.445	0.587	0.382	0.297	0.248	0.216
25	8.627	2.108	0.515	0.337	0.263	0.221	0.192
35	8.349	1.780	0.379	0.238	0.181	0.150	0.129
45	7.723	1.916	0.475	0.312	0.244	0.205	0.179
55	5.436	1.429	0.376	0.251	0.199	0.168	0.148
65	4.396	1.028	0.240	0.155	0.120	0.100	0.087