

Efecto de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana (*Annona muricata* L.)

Effect of temperature and soluble solid concentration on the rheological properties of the pulp of soursop (*Annona muricata* L.)

Luis Márquez Villacorta¹, Carla Pretell Vásquez²,
Raúl Siche Jara³

RESUMEN

Se determinaron las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana a 30, 40, 50, y 60 °C y concentraciones de sólidos solubles de 15, 20, 25 y 30 °Brix, usando un reómetro rotacional. Los reogramas denotaron un comportamiento de fluido plástico general y fueron ajustados adecuadamente por el modelo Herschel-Bulkley. La temperatura y concentración de sólidos solubles mostraron un efecto significativo sobre las propiedades reológicas. El índice de comportamiento de flujo fue 0,527–0,708; el índice de consistencia, 0,745–2,386 Pa.sⁿ; el esfuerzo cortante inicial, 3,204–11,146 Pa. Una ecuación tipo Arrhenius explicó adecuadamente el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente. La energía de activación disminuyó con el incremento de sólidos solubles, desde 4,928 kcal/mol para 15 °Brix hasta 3,110 kcal/mol para 30 °Brix. El modelo potencial fijó apropiadamente el efecto de la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente. Modelos exponenciales propuestos explicaron el efecto combinado de la temperatura, concentración y velocidad de corte sobre la viscosidad aparente.

Palabras clave: Reología, guanábana, concentración, temperatura.

¹ Ingeniero en Industrias Alimentarias, Maestro en Tecnología de Alimentos. Docente de la Universidad Privada Antenor Orrego (lmarquezv@upao.edu.pe).

² Ingeniera en Industrias Alimentarias, Maestra en Tecnología de Alimentos. Docente de la Universidad Privada Antenor Orrego.

³ Ingeniero Agroindustrial, Doctor en Ingeniería de Alimentos. Docente de la Universidad Nacional de Trujillo.

ABSTRACT

Rheological properties of soursop pulp were determined at 30, 40, 50, and 60 °C and soluble solids concentrations of 15, 20, 25 and 30 °Brix, using a rotational rheometer. The rheograms showed a general plastic flow behavior and were fitted adequately by the Herschel-Bulkley model. Temperature and soluble solid concentration showed a significant effect on the rheological properties. The flow behavior index was 0,527–0,708. The consistency index was 0,745–2,386 Pa.sⁿ. The yield stress was 3,204–11,146 Pa. Arrhenius type equation adequately explained the effect of temperature on apparent viscosity. The activation energy decreased with the increase of soluble solids, ranging from 4,928 kcal/mol at 15 °Brix to 3,110 kcal/mol at 30 °Brix. The potential model fitted appropriately the effect of soluble solids concentration on the apparent viscosity. The exponential model proposed explained the combined effect of temperature, soluble solids concentration, and shear rate on the apparent viscosity.

Key words: Rheology, soursop, concentration, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

La producción y exportación de frutas ha registrado una expansión muy interesante a lo largo del 2001-2011. Algunas frutas en fresco o procesadas han encontrado importantes oportunidades comerciales en los mercados externos. Los productos con potencial de crecimiento en el corto plazo son la chirimoya, guanábana, granadilla y el higo. Actualmente, la guanábana es exportada mayormente en forma de pulpa y existe un incremento en la demanda del 30% para el año 2012, lo que permite tener un crecimiento sostenido, ya que el precio también subiría a pesar de la crisis económica mundial (OIA-MINAG, 2011; Agencia Agraria de Noticias, 2012; Agroeconómica Negocios e Inversión, 2012).

La transformación de la materia prima en pulpa viabiliza su utilización en numerosos procesos que abarca desde una conservación a largo plazo por congelación y adición de conservantes, hasta la posibilidad de concentración para la elaboración de nuevos productos. El uso de las pulpas de frutas a nivel industrial ha crecido ya que son utilizadas en la elaboración de distintos tipos de productos, tales como: mermeladas, yogurt, jugos clarificados vía enzimática, bebidas alcohólicas, néctares, alimentos para bebé, postres, y otros (Guerrero, 2008; Guedes y otros, 2010).

La reología es definida como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia (Steffe, 1996). La reología en alimentos es definida como el estudio de la deformación de los materiales como materia prima, productos intermedios y terminados que son manipulados en la industria de alimentos (Barbosa-Cánovas y otros, 2002).

La reología se utiliza en la ciencia e ingeniería de los alimentos para definir la consistencia de diferentes productos. Reológicamente, la consistencia es descrita por dos componentes: 1) la viscosidad (lo espeso que es un producto o dificultad para deslizarse), y 2) la elasticidad (tenacidad, estructura). Para el estudio del comportamiento reológico de los diferentes productos, es necesario recurrir a la reometría. La reología de fluidos estudia la relación que existe entre la fuerza motriz que provoca el movimiento (esfuerzo cortante, τ) y la velocidad de flujo que se origina (el gradiente del perfil de velocidades, γ). El esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de área aplicada paralelamente al desplazamiento (cortante); la velocidad de corte se define como el gradiente (velocidad espacial de cambio) del perfil de velocidades (Huaranga y Matos, 2011).

Los alimentos se disponen como sólidos, líquidos y semisólidos. Algunos alimentos, entre los que se encuentran los helados y las grasas, son sólidos a una temperatura y líquidos a otra. Otros son suspensiones (mermeladas, zumos, purés y pulpas de frutas), o emulsiones como la leche. Debido a la amplia variación en su estructura, el comportamiento al flujo de los alimentos fluidos presenta una amplia gama de modelos que van desde el simple newtoniano a los no newtonianos independientes del tiempo (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

En la Figura 1 se presenta los reogramas para la clasificación de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

A lo largo de su proceso de elaboración, la pulpa de fruta es sometida a una serie de manipulaciones y tratamientos, como circulación a través de tuberías y

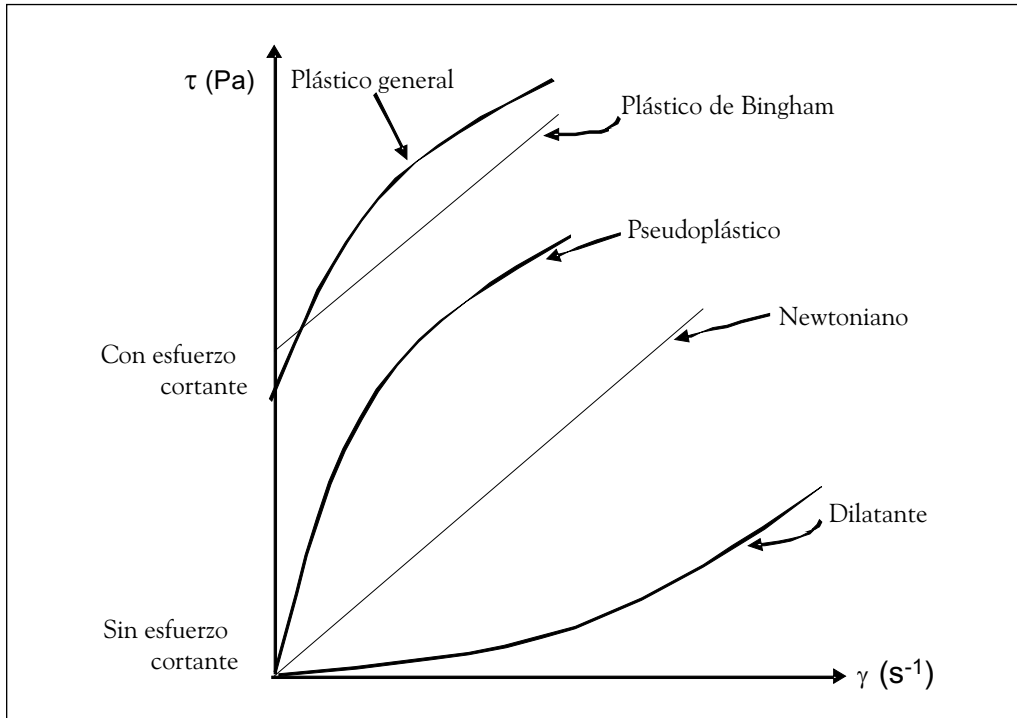


Figura 1. Esfuerzo de corte frente a velocidad de corte para fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

equipos de proceso, calentamiento, enfriamiento y pasteurización en las que tiene lugar una transferencia de calor. En todas estas operaciones, las características reológicas de las pulpas de fruta desempeñan un papel fundamental (Guerrero, 2008; Andrade y otros, 2009).

El comportamiento reológico de los fluidos alimenticios como pulpas y zumos de frutas es un factor de mucha importancia en el dimensionamiento de los equipos de la industria procesadora, además de constituir uno de los factores de validación de la calidad del producto. El comportamiento reológico de estos fluidos depende de su composición, están constituidos básicamente de agua y diversos sólidos solubles e insolubles. Los sólidos insolubles a su vez tienen importante influencia sobre las propiedades reológicas de los zumos y pulpas, y su eliminación total o parcial da lugar a la elaboración de alimentos procesados con diferente grado de turbidez y consistencia (Pereira y otros, 2002; Guedes y otros, 2010).

Las propiedades reológicas de los alimentos son determinadas por la medición de la fuerza y deformación. Varios modelos han sido usados para describir el comportamiento de flujo de los alimentos; por ejem-

plo, los modelos lineales (Newtoniano o plástico Bingham), Ley de Potencia (Ostwald de Waele), Herschel-Bulkey (Ley de Potencia con esfuerzo de corte inicial) y Casson. Los modelos Ostwald de Waele y Herschel-Bulkey son los más usados en alimentos no newtonianos, como las pulpas de frutas para describir sus propiedades de flujo. Las propiedades reológicas de los alimentos están fuertemente influenciadas por la temperatura, concentración de sólidos solubles o totales y estado físico de la dispersión. Los alimentos líquidos y semisólidos están sometidos continuamente a cambios de temperatura, empezando por el proceso de elaboración y pasando por los periodos de transporte y almacenamiento, donde las condiciones de temperatura a las que son sometidos pueden variar notablemente. Por este motivo, es muy importante conocer sus propiedades reológicas en función de la temperatura (Dak y otros, 2006, Ferreira y otros, 2008; Andrade y otros, 2009).

La presente investigación planteó el objetivo de:

- Determinar el efecto de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana.

2. METODOLOGÍA

2.1. Lugar de ejecución

Las pruebas experimentales y análisis fueron realizadas en el laboratorio de Ingeniería de Alimentos de Alimentos de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo.

2.2. Materia prima

Se utilizaron frutos de Guanábana (*Annona muricata* L.) procedente del distrito Virú, región La Libertad.

2.3. Enzima

Biopectinasa L, de la empresa Biocon S.A. Barcelona-España.

2.4. Obtención de la pulpa de guanábana

Se tuvo cuidado en la manipulación de los frutos, a fin de evitar daños físicos. Se seleccionaron los frutos enteros en función a su apariencia general (color verde característico de la cáscara, aroma característico y sin magulladuras), clasificándose de acuerdo al contenido de sólidos solubles entre 12 y 14 °Brix. La cáscara de guanábana se limpió con agua clorada a 40 ppm con la finalidad de eliminar sustancias extrañas en la superficie que la contaminan. Los frutos se cortaron en mitades utilizando cuchillos de acero inoxidable y la parte carnosa fue separada manualmente de las semillas. El pulpeado se realizó con una malla de 2 mm; luego, la pulpa fue homogenizada en una licuadora a 1500 rpm durante 10 min con la finalidad de homogenizarla, se tamizó con una malla de 0,5 mm para remover parte de la fibra y obtener una consistencia uniforme. La pulpa se congeló a -18 °C y conservó en estas condiciones durante 48 horas para después ser descongelada a temperatura ambiente, por un tiempo aproximado de 6 horas. La pulpa fue despectinizada mediante la adición de la enzima Biopectinasa L. a 30 ppm, durante 12 horas a 20-25 °C. Posteriormente, se inactivó la enzima colocando las muestras en baño maría a 90 °C por 5 min. Finalmente, la pulpa se estandarizó en el contenido de sólidos solubles en 15, 20, 25 y 30 °Brix, mediante la adición de sacarosa.

2.5. Análisis fisicoquímicos

Se realizaron, según lo recomendado por la AOAC (1997).

Determinación de sólidos solubles totales. Con un refractómetro portátil calibrado a 20 °C.

Determinación del pH. Con un potenciómetro digital calibrado.

Determinación de acidez titulable. Con NaOH 0,1 N.

Determinación de humedad: En estufa a 105 °C.

2.6 Evaluación de las propiedades reológicas

2.6.1. Medidas reológicas

Las medidas fueron realizadas utilizando un reómetro rotacional Brookfield modelo RVDV-III con el dispositivo para muestra pequeña y el spindle SC-27. Las muestras de la pulpa de guanábana a 15, 20, 25 y 30 °Brix fueron mantenidas a 30, 40, 50 y 60 °C, usando un termostato de recirculación marca Selecta. El equipo operó en un rango de velocidad rotacional de 1-100 rpm, obteniéndose la lectura directa de la viscosidad aparente (Pa.s), esfuerzo cortante (Pa), velocidad de corte (s^{-1}) y torque entre 10-90% según lo recomendado por el manual del reómetro.

2.6.2. Determinación y ajuste de reogramas

Se graficó el esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para obtener los reogramas de la pulpa de guanábana. Se dedujo un comportamiento de fluido no newtoniano, tipo plástico general del modelo Herschel-Bulkley (Rao, 2005), (ecuación 1):

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

k : índice de consistencia (Pa.sⁿ).

n : índice de comportamiento de flujo (adimensional).

Si n > 1: dilatante.

Si n < 1: pseudoplástico.

τ_0 : esfuerzo cortante inicial (Pa).

El modelo Herschel-Bulkley es elegido para fijar datos experimentales en pulpas de frutas debido a su característica de ser un modelo completo que puede describir todos los parámetros reológicos (Esfuerzo cortante inicial, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo).

Según lo indicado por Rao (2005), se calculó el valor del esfuerzo cortante inicial (τ_0), para lo cual, se utilizó la ecuación de Casson, (ecuación 2):

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + k\sqrt{\gamma} \quad (2)$$

2.6.3. Determinación de k y n

Los valores de índice de consistencia (k) e índice de comportamiento de flujo (n) se determinaron utilizando una modificación en forma linealizada de la ecuación 1, según lo indicado por Rao (2005), (ecuación 3):

$$\log(\tau - \tau_0) = \log k + n \log \gamma \quad (3)$$

2.6.4. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente se estudió mediante una expresión de tipo Arrhenius (Rao, 2005), (ecuación 4):

$$\mu_a = A_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

Donde:

- μ_a : viscosidad aparente (Pa.s).
- A_0 : constante empírica (Pa.s).
- E_a : energía de activación de flujo (kcal/mol).
- R: constante universal de los gases perfectos (1,987 kcal/mol.K).
- T: temperatura absoluta (K).

2.6.5. Efecto de la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente

Fue estudiado mediante relaciones del tipo exponencial y potencial (Da Silva y otros, 2005), (ecuaciones 5 y 6):

$$\mu_a = a_{0,n} \exp(a_{1,n}.C) \quad (5)$$

Donde:

- $a_{0,n}$: constante de proporcionalidad (Pa.s).
- $a_{1,n}$: constante de proporcionalidad ($^{\circ}\text{Brix}^{-1}$).
- C: concentración de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$).

$$\mu_a = a_{0,n}.C^{a_{1,n}} \quad (6)$$

Donde:

- $a_{0,n}$: constante de proporcionalidad (Pa.s. $^{\circ}\text{Brix}^{a_{1,n}}$).
- $a_{1,n}$: constante de proporcionalidad (adimensional).
- C: concentración de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$).

2.6.6. Efecto combinado de la temperatura, concentración y velocidad de corte sobre la viscosidad aparente

Fue estudiado mediante los modelos son propuestos por Arslan y otros (2005), (ecuaciones 7 y 8):

$$\mu_a = k_1 \exp\left(\frac{E_a}{RT} + d_1.C\right) \gamma^{\bar{n}-1} \quad (7)$$

$$\mu_a = k_2 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) C^{d_2} \gamma^{\bar{n}-1} \quad (8)$$

Donde:

k_1, k_2, d_1, d_2 : constantes de proporcionalidad.

n: valor promedio del índice de comportamiento de flujo.

2.7. Análisis estadístico

El análisis de varianza y el ajuste de los datos experimentales fueron realizados utilizando el programa Statistica for Windows software, versión 6,0 (Statsoft, 2004). El nivel de confianza fue del 95% y se trabajó con dos repeticiones experimentales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de guanábana

Se expresó como 12,1 °Brix; 4,0 de pH; 0,48 % de acidez titulable (expresada en ácido cítrico) y 82% de humedad. Ojeda y otros (2007) indicaron en pulpa de guanábana valores de sólidos solubles de 14 °Brix; pH 4,0; 0,47 % de acidez titulable (expresada en ácido cítrico) y 81% de humedad. Así mismo, Umme y otros (1997) reportaron en pulpa de guanábana valores de 11 °Brix y un pH de 3,7. Se aprecia, que los valores experimentales obtenidos son cercanos a los mencionados en otras investigaciones; sin embargo, las pequeñas variaciones se atribuyen al tipo de suelo, variaciones climáticas, variedad y grado de maduración del fruto.

3.2. Comportamiento reológico de la pulpa de guanábana

En la Figura 2, se muestran los reogramas de la pulpa de guanábana a 20 °Brix, a las diferentes temperaturas de estudio. Las curvas ascendentes se encuentran sobrepuestas, indicando que el fluido presenta un comportamiento reológico independiente del tiempo (Lago y otros, 2011). También se denota un comportamiento de fluido tipo plástico general, con esfuerzo cortante inicial típico y, en el que, por encima de él, se denota una tendencia de pseudoplasticidad, donde el

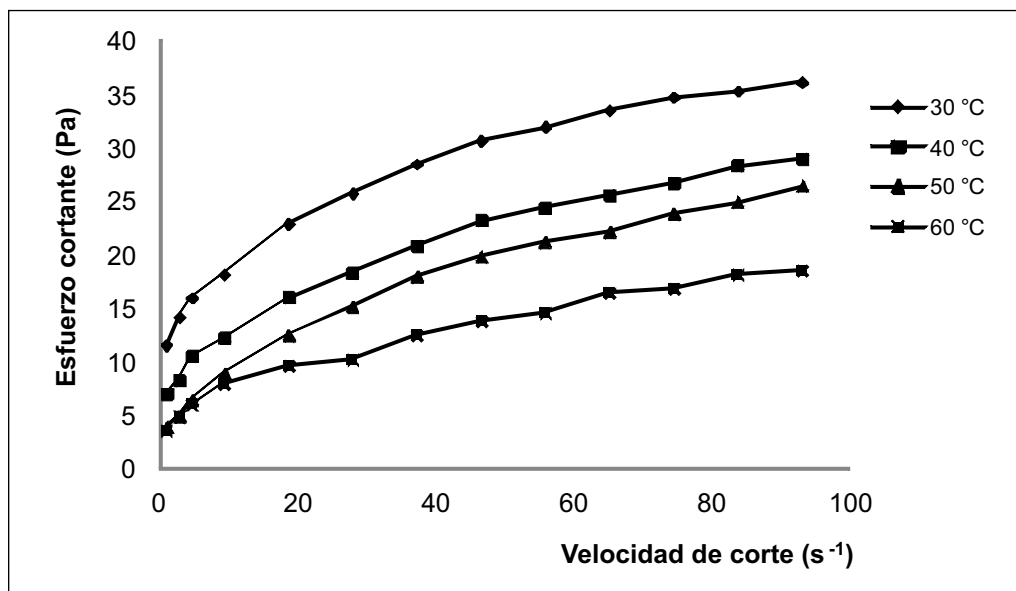


Figura 2. Reogramas de la pulpa de guanábana a 20 °Brix a diferentes temperaturas.

incremento de la velocidad de corte genera un incremento en el esfuerzo cortante; además, la posición relativa de las curvas muestra una disminución de la viscosidad aparente con el incremento de la temperatura (Steffe, 1996; Pereira y otros, 2002). Este comportamiento en la viscosidad aparente se explica por el rompimiento estructural de la pulpa debido a las fuerzas hidrodinámicas generadas y al incremento del alineamiento de las moléculas que lo constituyen como los azúcares y pectinas (Arslan y otros, 2005; Rodríguez y otros, 2006; Matos y Aguilar, 2010). El comportamiento tipo plástico general en pulpas y zumos de frutas ha sido observado por varios autores, como Lago y otros (2011) en zumo concentrado de yacón; Andrade y otros (2009), en pulpa de níspero; Ferreira y otros (2008), en pulpa de cupuacu; Isidoro y otros (2006), en pulpa de butia; Dutta y otros (2006), en puré de calabaza; Da Silva y otros (2005), en jugo concentrado de acerola; Ahmed y Ramaswany (2004), en puré de papaya; Pereira y otros (2002), en pulpa de cupuacu; y Bhattacharya y Rastogi (1998), en pulpa de mango.

El modelo Herschel-Bulkley fue el utilizado para determinar las propiedades reológicas características del fluido tipo plástico general. En el Cuadro 1, se muestra las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana obtenidos en los diferentes tratamientos. Se observa que el modelo Herschel-Bulkley ajusta y

explica adecuadamente el comportamiento reológico de la pulpa de guanábana, denotado por los altos valores de r^2 . Ahmed y Ramaswany (2004) sugieren que para un buen ajuste del modelo, el r^2 debe ser mayor o igual a 0,80. Montgomery y Runge (2006), mencionan que el r^2 es una medida de la cantidad de la variabilidad de los datos que está explicada o considerada por el modelo de regresión.

El esfuerzo cortante inicial y el índice de consistencia mostraron una disminución con el incremento de la temperatura, lo cual era de esperarse debido a la tendencia general en la disminución de la viscosidad por efecto de la temperatura (Maceiras y otros, 2006). Un comportamiento similar fue observado por Andrade y otros (2009), en pulpa de níspero; Andrade y otros (2009), en pulpa de sapodilla; Ferreira y otros (2008), en pulpa de cupuacu; Isidoro y otros (2006), en pulpa de butia; Dutta y otros (2006), en puré de calabaza; Da Silva y otros (2005), en jugo concentrado de acerola; Ahmed y Ramaswany (2004), en puré de papaya; Pereira y otros (2002), en pulpa de cupuacu.

El índice de comportamiento de flujo indica el grado de pseudoplasticidad de los zumos y pulpas de fruta, de forma que cuanto más cercano se encuentre a la unidad mayor comportamiento pseudoplástico. Se encontró una tendencia no definida con la temperatura, lo cual se explica por el hecho de que la aplicación de altas temperaturas comprometió la estructura química

Cuadro 1
PROPIEDADES REOLÓGICAS OBTENIDAS PARA LA
PULPA DE GUANÁBANA

C (°Brix)	T (°C)	μ_a (Pa.s)*	τ_0 (Pa)	k (Pa.sn)	n (adm)	r^2
15	30	0,433	5,571	1,703	0,641	0,988
	40	0,371	5,730	1,312	0,527	0,985
	50	0,269	4,122	1,017	0,669	0,984
	60	0,212	3,713	0,745	0,653	0,992
20	30	0,468	11,146	1,859	0,598	0,989
	40	0,392	6,186	1,364	0,643	0,982
	50	0,285	3,204	1,036	0,708	0,983
	60	0,247	3,239	1,012	0,628	0,991
25	30	0,477	8,173	2,117	0,599	0,988
	40	0,408	6,886	1,513	0,590	0,993
	50	0,321	3,534	1,183	0,627	0,996
	60	0,292	3,530	1,038	0,555	0,988
30	30	0,493	6,999	2,386	0,555	0,982
	40	0,413	5,773	1,614	0,587	0,993
	50	0,330	5,375	1,296	0,527	0,983
	60	0,318	4,158	1,108	0,537	0,989

*Valor de viscosidad aparente correspondientes a 50 rpm y 46.5 s-1.

mica, cambiando las características fisicoquímicas de la pulpa (Andrade y otros, 2009). Un comportamiento similar fue observado por Arslan y otros (2005), en mezclas de sésamo/jugo concentrado de uva; Andrade y otros (2009), en pulpa de níspero.

La cantidad de sólidos solubles se relaciona directamente con el contenido de sólidos totales y contenido de sólidos en suspensión (contenido de pulpa) que afectan a los parámetros del modelo (Da Silva y otros, 2005). Como se puede apreciar en el Cuadro 4 los valores de esfuerzo cortante inicial e índice de consistencia aumentaron con el incremento de la concentración de sólidos solubles a una temperatura constante, y disminuyeron con el aumento de la temperatura a una concentración de sólidos solubles constante. El incremento de la concentración de sólidos solubles, tiende a incrementar el esfuerzo de corte inicial, lo cual coincide con lo indicado por Garza (1998), quien menciona que conforme aumenta la concentración de los sólidos solubles, el esfuerzo de corte inicial tiende a aumentar. Este comportamiento en el esfuerzo cortante inicial e índice de consistencia fue reportado

por Da Silva y otros (2005), en zumo concentrado de acerola; Arslan y otros (2005), en mezclas de sésamo/jugo concentrado de uva; Guedes y otros (2010), en pulpa de sandía; y Matos y Aguilar (2010), en pulpa de tuna.

La viscosidad aparente, a medida que incrementa la temperatura y a una concentración de sólidos solubles constante, disminuye. Cuando se mantiene la temperatura constante y aumentan los sólidos solubles, la viscosidad aparente tiende a aumentar, lo cual coincide con lo reportado por Garza (1998), Da Silva y otros (2005), Arslan y otros (2005) y Matos y Aguilar (2010), quienes indican, que a concentración de sólidos solubles constante, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la temperatura y, para una temperatura fija, la viscosidad aparente aumenta con la concentración de sólidos solubles en las muestras. Garza (1998) menciona que la pulpa de fruta está constituida básicamente por una dispersión de partículas sólidas en una solución acuosa de azúcares, ácidos orgánicos y pectinas, por lo que, desde un punto de vista general, se puede considerar a la pulpa de frutas como una

dispersión de la forma sólido-líquido; con lo que resulta evidente que su comportamiento reológico estará regido por las características de la fase sólida (forma, tamaño y concentración de las partículas) y por las de la fase líquida (naturaleza, forma, tamaño y concentración de las especies moleculares que la componen). Por lo tanto, conforme aumenta el grado de concentración de sólidos solubles, las partículas sólidas, en principio individuales, quedan cada vez más próximas unas de otras, provocando, un fuerte incremento en los parámetros reológicos al alcanzar una determinada concentración crítica.

3.3. Efecto de temperatura y concentración

El incremento de la temperatura resulta en una considerable disminución de la viscosidad en pulpas. Con el aumento de la temperatura, la energía térmica de las moléculas aumenta y se desarrolla un distanciamiento molecular debido a la reducción de las fuerzas intermoleculares, por lo tanto, la viscosidad aparente de los fluidos disminuye (Arslan y otros, 2005).

La viscosidad aparente de pulpas de fruta disminuye con incrementos en la temperatura y velocidad de corte hasta que alcanzan una tendencia lineal. Cuando la velocidad de corte se asocia con la temperatura, las partículas pueden reordenarse en una dirección paralela a la velocidad de corte, y las partículas grandes podrían romperse en partículas pequeñas. Las partículas fluyen fácilmente como resultado de la resistencia derivada de las interacciones partícula-partícula, lo que resulta en una disminución de la viscosidad. Se sabe que los fluidos con menor viscosidad tienen una menor pérdida de carga durante el flujo, lo que produce en una disminución de la demanda de energía para el proceso (Haminiuk y otros, 2006).

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de fluidos alimenticios a una velocidad de corte constante es descrito por una ecuación tipo Arrhenius, en la cual la viscosidad aparente disminuye como una función exponencial de la temperatura. En el Cuadro 2, se presenta la energía de activación de la pulpa de guanábana para las diferentes concentraciones. El modelo de Arrhenius dio una buena descripción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente en la pulpa de guanábana de acuerdo a los altos valores de r^2 .

Los valores de energía de activación variaron entre 4,928 kcal/mol en la pulpa a 15 °Brix hasta 3,110 kcal/mol para 30 °Brix. Existe una clara tendencia de que la energía de activación disminuye con el aumento del contenido de sólidos solubles en las muestras de pulpa de guanábana. Un comportamiento similar fue observado por Matos y Aguilar (2010), en pulpa de tuna; Guedes y otros (2010), en pulpa de sandía; Da Silva y otros (2005), en jugo concentrado de acerola. Se puede decir que a un mayor valor de energía de activación, mayor será la dependencia de la viscosidad aparente el índice de consistencia con la temperatura, es decir, mayor será la variación de la viscosidad y del índice de consistencia con la temperatura a una concentración dada.

En la Figura 3, se presenta el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente en pulpa de guanábana a diferentes concentraciones de sólidos solubles observándose que la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la temperatura. Una variación de la viscosidad aparente presenta comportamiento muy similar para 25 y 30 °Brix, indicando que el efecto de la temperatura en este rango de sólidos solubles fue similar. Cuando la concentración disminuyó a 15 °Brix, la viscosidad disminuyó en mayor grado, demostrando una mayor dependencia con la temperatura.

Cuadro 2
ENERGÍA DE ACTIVACIÓN DE LA PULPA DE
GUANÁBANA A DIFERENTES
CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS SOLUBLES

C (°Brix)	E_a (kcal/mol)	r^2
15	4,928	0,979
20	4,485	0,980
25	3,436	0,980
30	3,110	0,950

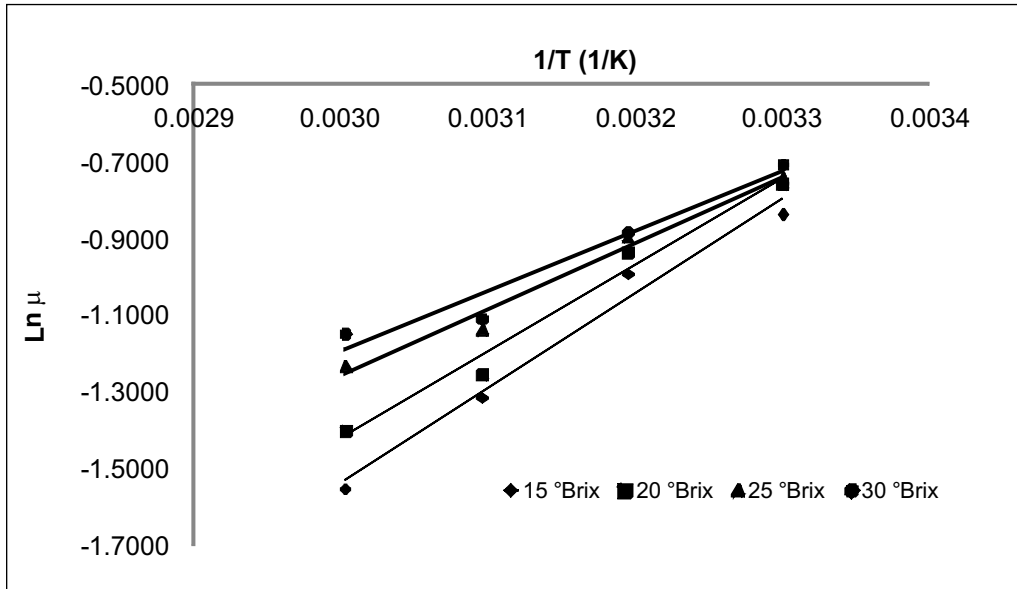


Figura 3. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente en pulpa de guanábana a diferentes concentraciones de sólidos solubles.

El efecto de la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente de pulpas de frutas es importante en aplicaciones, tal como la concentración de alimentos fluidos. Existen diferentes técnicas utilizadas para concentrar pulpas de fruta, la forma de concentración más utilizada es por evaporación que va acompañada con un aumento de la viscosidad aparente, que provoca una reducción de la transferencia de calor y de la circulación de flujo dentro de las tuberías, que puede llevar a la degradación del material en las superficies cercanas al medio calefactor. Un control de la viscosidad aparente por homogenización es una técnica eficiente en la concentración de zumos y pulpas de fruta. La clarificación física y enzimática también son alternativas para reducir la viscosidad aparente en pulpas de frutas (Toralles y otros, 2006).

En los Cuadros 3 y 4, se muestran los resultados de ajuste de la viscosidad aparente con la concentración de sólidos solubles, utilizando los modelos potencial y exponencial, respectivamente. El modelo potencial definió mejor las curvas de viscosidad aparente con la concentración de sólidos solubles (mayores valores de r^2). Este comportamiento es reportado por Da Silva y otros (2005), en zumo concentrado de acerola; Arslan y otros (2005), en mezclas de sésamo/jugo concentrado de uva; Toralles y otros (2006), en puré de durazno; Guedes y otros (2010), en pulpa de sandía; y Matos y Aguilar (2010), en pulpa de tuna.

En el Cuadro 5, se presenta el análisis de varianza para las propiedades reológicas de pulpa de guanábana, se observa que existió efecto significativo ($p < 0,05$) de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre los parámetros reológicos.

Andrade y otros (2010) encontraron efecto significativo de la temperatura sobre la viscosidad aparente, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo en pulpa de zapote; Matos y Aguilar (2010), de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente e índice de consistencia en pulpa de tuna; Andrade y otros (2009), de la temperatura sobre la viscosidad aparente, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo en pulpa de níspero; Toralles y otros (2006) de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente e índice de consistencia en puré de durazno; Arslan y otros (2005), de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo en pasta de sésamo/jugo concentrado de uva.

3.4. Efecto combinado de la temperatura, concentración y velocidad de corte

Debido a la importancia en aplicaciones de ingeniería, el efecto de la temperatura y la concentración se pueden combinar en una sola ecuación que exprese la variación de la viscosidad aparente en función de

Cuadro 3
PARÁMETROS $a_{0,n}$ Y $a_{1,n}$ DEL MODELO POTENCIAL EN
FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS
SOLUBLES EN PULPA DE GUANÁBANA

T (°C)	$a_{0,n}$ (Pa.s/°Brix ^{2,1})	$a_{1,n}$ (adm)	r^2
30	0,230	0,229	0,942
40	0,112	0,392	0,828
50	0,093	0,393	0,989
60	0,032	0,678	0,993

Cuadro 4
PARÁMETROS $a_{0,n}$ Y $a_{1,n}$ DEL MODELO EXPONENCIAL EN
FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS
SOLUBLES EN PULPA DE GUANÁBANA

T (°C)	$a_{0,n}$ (Pa.s)	$a_{1,n}$ (°Brix ⁻¹)	r^2
30	0,370	0,010	0,886
40	0,255	0,017	0,753
50	0,209	0,018	0,959
60	0,129	0,031	0,974

Cuadro 5
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS
DE PULPA DE GUANÁBANA

Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p
μ_a	° Brix	0,191	3	0,064	403,028	0,000
	Temperatura	0,030	3	0,010	62,407	0,000
	°Brix-Temperatura	0,002	9	0	1,67	0,178
	Dentro del grupo	0,003	16	0		
	Total	0,226	31			
k	° Brix	5,002	3	1,667	7846,142	0,000
	Temperatura	0,710	3	0,237	1113,798	0,000
	°Brix-Temperatura	0,147	9	0,016	76,676	0,000
	Dentro del grupo	0,003	16	0		
	Total	5,862	31			
n	° Brix	0,012	3	0,004	25,474	0,000
	Temperatura	0,036	3	0,012	77,267	0,000
	°Brix-Temperatura	0,032	9	0,004	22,927	0,000
	Dentro del grupo	0,002	16	0		
	Total	0,082	31			
t_0	° Brix	61,936	3	20,645	6669,207	0,000
	Temperatura	28,351	3	9,450	3052,812	0,000
	°Brix-Temperatura	87,368	9	9,708	3135,923	0,000
	Dentro del grupo	0,050	16	0,003		
	Total	177,704	31			

Cuadro 6
EFFECTO COMBINADO DE LA TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN Y VELOCIDAD DE CORTE DE PULPA DE GUANÁBANA

Ecuación	i	k_i	d_i	E_a (kcal/mol)	n	r^2
6	1	0,0001802	0,02548	3,896	0,703	0,953
7	2	0,0000986	0,49546	3,896	0,708	0,956

estas variables. Se utilizó las ecuaciones 6 y 7, que, luego de un análisis de regresión lineal múltiple, condujeron a las formas linealizadas de las ecuaciones; las constantes de ambos ecuaciones se muestran en el Cuadro 6. Se observa que ambos ecuaciones describen adecuadamente la influencia combinada de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente y proporcionan un alto grado de ajuste, por lo cual, pueden ser recomendadas para su aplicación.

4. CONCLUSIONES

La pulpa de guanábana presentó un comportamiento No Newtoniano tipo plástico general que fue adecuadamente ajustado por el modelo Herschel-Bulkley.

La temperatura y concentración de sólidos solubles mostraron un efecto significativo sobre las viscosidad aparente, esfuerzo constante inicial, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo de la pulpa de guanábana.

La viscosidad aparente, esfuerzo cortante inicial y el índice de consistencia de la pulpa de guanábana disminuyeron con el incremento de la temperatura; el índice de comportamiento de flujo no presentó una tendencia definida.

La viscosidad aparente, esfuerzo cortante inicial y el índice de consistencia de la pulpa de guanábana aumentaron con el incremento de la concentración de sólidos solubles a una temperatura constante, y disminuyeron con el aumento de la temperatura a una concentración de sólidos solubles constante; el índice de comportamiento de flujo no presentó una tendencia definida.

Una ecuación tipo Arrhenius explicó adecuadamente el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente en la pulpa de guanábana. La energía de acti-

vación disminuyó con el incremento de la concentración.

El modelo potencial fijó apropiadamente el efecto de la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente de la pulpa de guanábana.

Los modelos exponenciales propuestos explicaron adecuadamente el efecto combinado de la temperatura, concentración de sólidos solubles y velocidad de corte sobre la viscosidad aparente de la pulpa de guanábana.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Agraria de Noticias, 2012: Disponible en: <http://www.agraria.pe/noticias/exportaciones-de-frutas-legumbres-y-hortalizas-crecerian-50>. Fecha de acceso: 04 febrero del 2012.
- Agroeconómica Negocios e Inversión, 2012 : Disponible en: <http://www.agroeconomica.pe/?s=pulpa+frutas>. Fecha de acceso: 04 febrero del 2012.
- Ahmed, J. y Ramaswamy H. 2004. Response surface methodology in rheological characterization of papaya puree. *International Journal of Food Properties* 7: 45-48.
- Andrade, R., Torres, R., Montes, E., Pérez, O., Bustamante, C. y Mora, B. 2010. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote. *Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad de Zulia* 33: 138-144.
- Andrade, R., Torres, R., Montes, E., Pérez, O., Restan, L. y Peña, R. 2009. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero. *Revista Luz de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Córdoba* 26: 599-612.
- Andrade, D., Ortega, F., Montes, E., Torres, R., Pérez, O., Castro, M. y Gutiérrez, L. 2009. Caracterización fisicoquímica y reológica de pulpa de guayaba variedades híbrido de Klom Sali, Puerto Rico, D14 y Red. Vitae, *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica de la Universidad de Antioquía* 16: 13-18.
- AOAC. 1997. *Official Methods of Analysis of the Official Agricultural Chemist*. 17th Edition. USA.
- Arslan, E., Yener, M. y Esin, A. 2005. Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/concentrated grape juice) blends. *Journal of Food Engineering* 69: 167-172.
- Barboza-Cánovas, G., Welti-Chanes, J. y Aguilera, J. 2002. *Engineering and Food for The 21st Century*. Editorial CRC Press. USA.

- Bhattacharya, S. y Rastogi, N. 1998. Rheological properties of enzyme-treated mango pulp. *Journal of Food Engineering* 36: 249-262.
- Da Silva, F., Pelegrine, D. y Gasparetto, C. 2005. Reología do suco de acerola: efeito da concentracao e temperatura. *Ciencia y Tecnología de Alimentos* 25: 121-126.
- Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S. 2006. Effect of temperature and concentration on rheological properties of "Kesar" mango juice. *Journal of Food Engineering* 30:1-5.
- Dak M., Verma, R. y Sharma, G. 2006. Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes. *Journal of food engineering* 76: 557-561.
- Dutta, D., Dutta, A., Raychaudhuri, U. y Chakraborty, R. 2006. Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering* 76: 538-546.
- Ferreira, G., De Oliveira, M. y Antun, M. 2008. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da pulpa de capuacu integral. *Revista Brasileira Fruticultura* 30: 385-389.
- Garza, S. 1998. Caracterización reológica y microbiológica y cinéticas de deterioro en cremogenado de melocotón. Tesis de Maestría de la Universidad de Lleida. España.
- Guedes, D., Ramos, A. y Diniz, M. 2010. Efeito da temperatura e da concentracao nas propriedades físicas da polpa de melancia. *Brazilian Journal of Food Technology* 13:279-285.
- Guerrero, A. 2008. Influencia de la temperatura en la inactivación de la pectinmetilesterasa durante tratamiento térmico en la pulpa de badea (*p. quadrangularis*). Tesis para optar Título de Ingeniera de Alimentos de Escuela Superior Politécnica del Litoral. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11945?mode=full>. Fecha de acceso 04 febrero 2012.
- Haminiuk, C., Sierakowski, M., Izidoro, D. y Masson, M. 2006. Caracterizacáo reológica da polpa de amora-preta. *Brazilian Journal of Food Tecnology* 9: 291-296.
- Haminiuk, C., Sierakowski, M. y Masson, M. 2006. Influence of temperature on the rheological behavior of whole aracá pulp. *LWT* 39: 426-430.
- Huaranga, E. y Matos, A. 2011. Importancia de los parámetros reológicos de la pulpa de capulí a diferentes temperaturas de procesamiento. I Congreso Nacional de Investigación de la Iglesia Adventista del Séptimo Día.
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. 2005. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. 2da Ed. Editorial Mundiprensa S.A., España.
- Isidoro, C., Sierakowski, M., Maciel, G., Bezerra, J., Branco, I. y Masson, M. 2006. Rheological properties of butia pulp. *International Journal of Food Engineering* 2: 1-10.
- Lago, C., Bernstein, A., Brandelli, A. y Noreña, C. 2011. Estudo do comportamento reológico, da atividade de agua e do ponto de inicio de congelamento do suco de yacón a diferentes concentracoes. *Brazilian Journal of Food Technology* 14:1-9.
- Maceiras, R., Alvarez, E. y Cancela, M. 2006. Rheological properties of fruit purees: effect of cooking. *Journal of Food Engineering* 56: 243-249.
- Matos, A. y Aguilar, D. 2010. Influencia de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus Indica*). *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 1: 58-65.
- Montgomery, D. y Runger, G. 2006. Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería. 2da Ed. Editorial Limusa S.A., México.
- OIA-MINAG. Oficina de Información Agraria del Ministerio de Agricultura La Libertad (2011).
- Ojeda, G., Coronado, J., Nava, R., Sulbarán, B., Araujo, D. y Cabrera, L. 2007. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de la guanábana (*Annona muricata*) cultivada en el occidente de Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad del Zulia* 41: 151-160.
- Pereira, M., Melo, A. y Feitosa, R. 2002. Comportamiento reológico da pulpa de cupuacu peneirada. *Revista Brasileira de Productos Agroindustriais* 4: 37-40.
- Rao, M. 2005. Rheological Properties of Fluid Foods: Food Science and Technology. *Engineering Properties of Foods*. 3rd edition. Marcel Dekker, New York, USA.
- Rodríguez, E., Fernández, A., Alcalá, L. y Ospina, B. 2006. Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Revista de Ingeniería y Desarrollo* 19: 17-30.
- Statsoft. (2004). *Statistica for window v. 6.0 (computer programmer manual)*. Statsoft, Inc. USA.
- Steffe, J. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. Editorial Freeman Press. Michigan, USA.
- Torales, R., Vendruscolo, J. y Vendruscolo, C. 2006. Reología de puré homogenizado de Pessego: efeito da temperatura e concentracao. *Brazilian Journal of Food Technology* 9:1-8.
- Umme, A., Asbi, B., Salmah, Y., Junainah, A. y Jamilah, B. 1997. Characteristics of soursop natural puree and determination of optimum conditions for pasteurization. *Food Chemistry* 58: 119-124.