

Modelo predictivo del comportamiento reológico de pulpas de fruta (Pera)

Muñoz Puentes, E; Rubio, L.A.; Chernikoff, R.; Possa, H.N.; Morant, M.A.
emunoz@fcai.uncu.edu.ar

Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo, San Martín 352,
San Rafael (Mza.), Argentina, Telefax: +54-2627-421947/433171

RESUMEN: Se efectuaron análisis fisicoquímicos y reológicos en distintas muestras de pulpas de pera de la región de Mendoza (Argentina), para las siguientes concentraciones: 12,5; 16; 20; 24 y 28°Bx y temperaturas: 30, 40 y 50°C. Además se realizaron mediciones adicionales a otras temperaturas para hallar los valores de Energía de Activación y estudiar el efecto de la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad. En todos los ensayos se observó que las mismas se corresponden con el modelo de la Ley de la Potencia para fluidos pseudoplásticos. A partir de las determinaciones reológicas se obtuvo una ecuación predictiva de la viscosidad aparente de las pulpas de pera, en función de la concentración de sólidos solubles y la temperatura. No existen diferencias significativas entre los valores calculados y los determinados.

Palabras clave: pulpas - pera - parámetros reológicos

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento reológico de los alimentos fluidos es de suma importancia para el diseño de equipos de proceso (concentración, bombeo, tamizado, desairado, mezclado y tratamientos térmicos diversos, entre otros), así como para evaluación sensorial, determinación de la estructura del alimento y control de calidad (Rao y Anantheswaram, 1982).

Desde el punto de vista reológico los zumos concentrados, clarificados y despectinizados presentan un comportamiento newtoniano. Sin embargo los derivados de frutas pertenecientes a los otros grupos no cumplen con la ley de Newton de la viscosidad, por lo que se dice que se comportan como fluido no newtonianos. El comportamiento de estos últimos, puede describirse mediante la ley de la potencia (Saravacos, 1970; Holdsworth, 1971; Crandall y Nelson; 1975; Rao, 1986), o mediante el modelo de Herschel–Bulkley, en el caso que presenten una tensión de fluencia diferente de cero (Crandall y col., 1982).

2. OBJETIVOS

El propósito del presente trabajo es:

- a) Calibrar los viscosímetros empleados y corroborar el buen funcionamiento de los mismos. Establecer curvas de calibración y determinar el rango de medición según la configuración adoptada.
- b) Caracterizar las propiedades de flujo de pulpas de pera de la zona de Mendoza, para conformar un banco de datos.
- c) Determinar el comportamiento reológico (en flujo y análisis de la tixotropía) en función de la temperatura y de la concentración.
- d) Establecer un modelo predictivo del efecto combinado que la temperatura y el contenido de sólidos, ejercen sobre la viscosidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó sobre muestras de pulpas de pera concentradas que se obtuvieron a través de un proceso industrial de concentración en evaporadores de único efecto, realizado por la empresa ARCOR S.A., durante las temporadas de elaboración 2005 y 2006. Las mismas no fueron clarificadas ni filtradas, por lo que presentaban pulpa y pectinas en suspensión.

Las muestras de concentrados de pera fueron retiradas de la empresa elaboradora en frascos de vidrio con tapas herméticas, y una vez en el laboratorio reológico, almacenadas en refrigerador a una temperatura de 1 – 2°C. Además, la empresa ARCOR S.A. proporcionó para la presente investigación un adicional de concentrados envasados en bolsas asépticas de 5 kg, con la finalidad de disponer de materias primas para realizar las restantes mediciones requeridas en el presente trabajo. Las mismas fueron llevadas por dilución a 12,5; 16; 20; 24 y 28°Brix y las determinaciones se efectuaron a diferentes temperaturas con dos viscosímetros “*Brookfield*” del tipo rotacional, modelos LVDV – III y HBDV – III, cuyos principios de operación se basa en la medición del torque requerido para rotar un elemento inmerso en un fluido a velocidad angular constante. El giro de este elemento en la muestra, denominado generalmente spindle o husillo, es accionado por un motor síncrono.

El resultado del torque, sufrido por el resorte calibrado es expresado como porcentaje del valor “673,7 *D·cm*”, que es el torque máximo capaz de medir el viscosímetro Brookfield LVDV – III y de un valor “57496 *D·cm*”, que es el torque máximo capaz de medir el viscosímetro Brookfield HBDV – III. Es posible abarcar un amplio rango de viscosidad usando distintas velocidades de rotación, las cuales pueden variar desde 0,1 *r.p.m.* hasta 250 *r.p.m.* con incrementos de 0,1 *r.p.m.* Esto proporciona 2500 velocidades de giro disponibles para realizar las mediciones reológicas, las que puede variarse durante el ensayo en forma manual o bien mediante la creación de un programa con el soft proporcionado junto al viscosímetro. Además de la posibilidad de variación de la velocidad de giro, pueden seleccionarse diferentes modelos de spindle, entre ellos los de la serie SC4 del tipo cilindros concéntricos, de los cuales los spindles SC4-21, SC4-25 y SC4-34 fueron utilizados para realizar las mediciones.

Es importante destacar que todos los ensayos fueron realizados por triplicado, de manera de tener una mayor precisión en los datos entregados por el equipo. Así las tres corridas en cada ensayo fueron estudiadas estadísticamente en conjunto, para hallar los valores de las constantes reológicas.

3.1. Análisis de las Propiedades de Flujo. Modelización de Resultados.

Los reogramas de “*Tensión de corte vs. Gradiente de velocidad*”, obtenidos a partir de los datos medidos con los viscosímetros, para las muestras estudiadas de concentrados, muestran un comportamiento típicamente pseudoplástico. Por esta razón, se aplicó la ecuación de “*Ostwald de Waele*” para modelizar el comportamiento reológico de éstas. Cabe recordar que esta ecuación deriva del “*Modelo de Cross*”, a partir del cual, realizando una serie de simplificaciones, se obtiene el modelo de Ostwald de Waele o modelo de la Ley de potencia.

$$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde:

σ = tensión de corte (Pa)

k = índice de consistencia (Pa·sⁿ)

$\dot{\gamma}$ = gradiente de velocidad (s⁻¹)

n = índice de comportamiento al flujo (adimensional)

Se evaluó la influencia de la concentración sobre el índice de consistencia al flujo (K):

$$K = K_c (C)^a \quad (2)$$

donde:

K_C = constante de proporcionalidad (Pa.s.°Brix^{-a})

C = concentración (°Brix)

a = constante de proporcionalidad adimensional.

3.2. Efecto Combinado de la Temperatura y la Concentración sobre las Propiedades de Flujo.

La metodología para determinar la magnitud de la influencia conjunta de la temperatura y la concentración sobre las muestras de cremogenado está basada en el modelo descrito por P. J. Fito y col., 1983.

Debido a que las muestras de peras estudiadas en el presente trabajo tienen un comportamiento típicamente pseudoplástico, similar al encontrado en muestras de concentrados de tomate, se cree conveniente emplear como base el método descrito por Fito y colaboradores para modelizar el efecto de la temperatura y la concentración sobre las pulpas estudiadas. Modelos similares con ligeras modificaciones abundan en la bibliografía especializada, por lo que el desarrollo de éste sólo intenta describir el efecto de ambos parámetros con resultados satisfactorios.

$$\eta_{ap} = f(T, \dot{\gamma}, C) \quad (3)$$

$$\eta_{ap} = A \cdot e^{\frac{Ea}{RT}} \cdot C^a(t) \cdot \dot{\gamma}^{(n_{(c)} - 1)} \quad (4)$$

donde:

η_{ap} = viscosidad aparente (Pa.s)

A = constante de proporcionalidad (Pa.s.°Brix^{-a}.s⁻¹)

Ea = energía de activación (kJoule.mol⁻¹)

R = constante Universal de los gases (kJoule.mol⁻¹.K⁻¹)

C = concentración (°Brix)

a = constante adimensional

$\dot{\gamma}$ = gradiente de velocidad (s⁻¹)

$n_{(c)}$: índice de comportamiento al flujo en función de la concentración.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales del gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$) con la tensión de corte (σ) han sido ajustadas a la Ley de la Potencia, con el método de los mínimos cuadrados.

En la Tabla 1 se muestran los análisis reológicos de las pulpas de pera obtenidos con la Ley de la Potencia (ecuación 1).

TABLA 1. Resumen de K y n para pulpa de pera

T (°C)		30	35	40	45	50	55	60	65
12,5°Bx	K	4,124	3,740	3,496	3,114	2,784	2,675	2,539	2,224
	n	0,328	0,352	0,363	0,368	0,390	0,380	0,388	0,407
16°Bx	K	12,357	9,883	6,615	4,147	4,082	3,964	3,653	3,308
	n	0,404	0,332	0,427	0,497	0,480	0,460	0,469	0,481
20°Bx	K	16,665	15,696	12,847	9,954	9,087	7,394	7,062	6,872
	n	0,391	0,398	0,412	0,452	0,451	0,501	0,502	0,504
24°Bx	K	38,905	36,091	31,024	30,290	28,074	27,089	25,586	25,142
	n	0,266	0,266	0,270	0,265	0,280	0,278	0,285	0,291
28°Bx	K	52,991	51,928	51,790	51,286	49,556	49,397	47,610	44,617
	n	0,264	0,261	0,247	0,250	0,253	0,252	0,254	0,263

En las Figuras 1 y 2, podemos observar que a mayor concentración, mayor tensión de corte para igual gradiente de velocidad; y dentro de una misma concentración, a mayor temperatura, menor tensión de corte.

Por otra parte, las muestras de peras, al tener cantidades moderadas de pectinas, muestran un comportamiento dependiente del tiempo, ya que la estructura tridimensional de éstas ejerce una marcada influencia sobre esta propiedad, se observó un comportamiento tixotrópico y por esta razón las curvas “ascendente” y “descendente” de los reogramas de “Tensiones de corte vs. Gradientes de velocidad” presentan una histéresis (datos no mostrados).

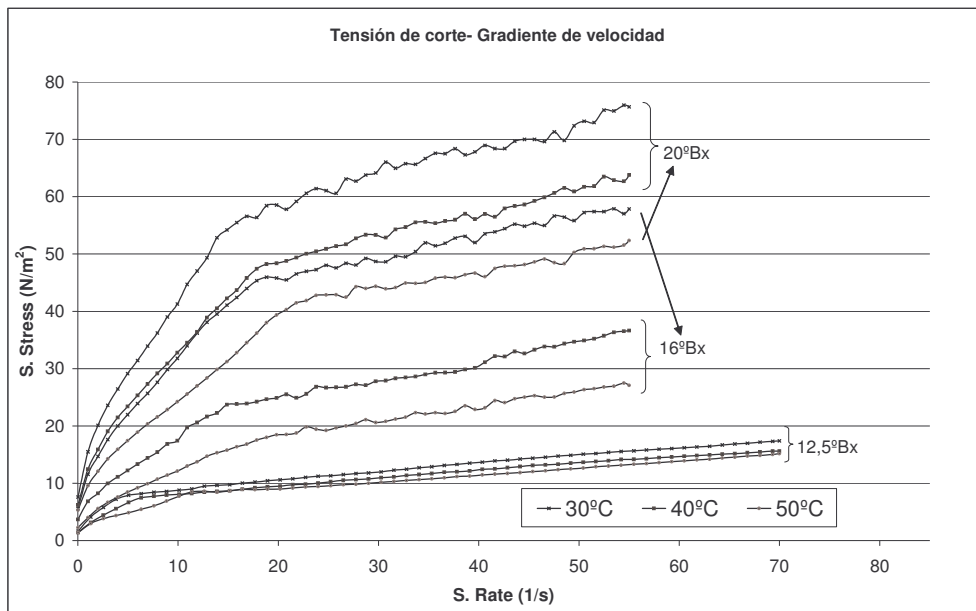


FIGURA 1. Valores experimentales de pulpas de pera a distintas temperaturas y 12,5, 16 y 20°Bx.

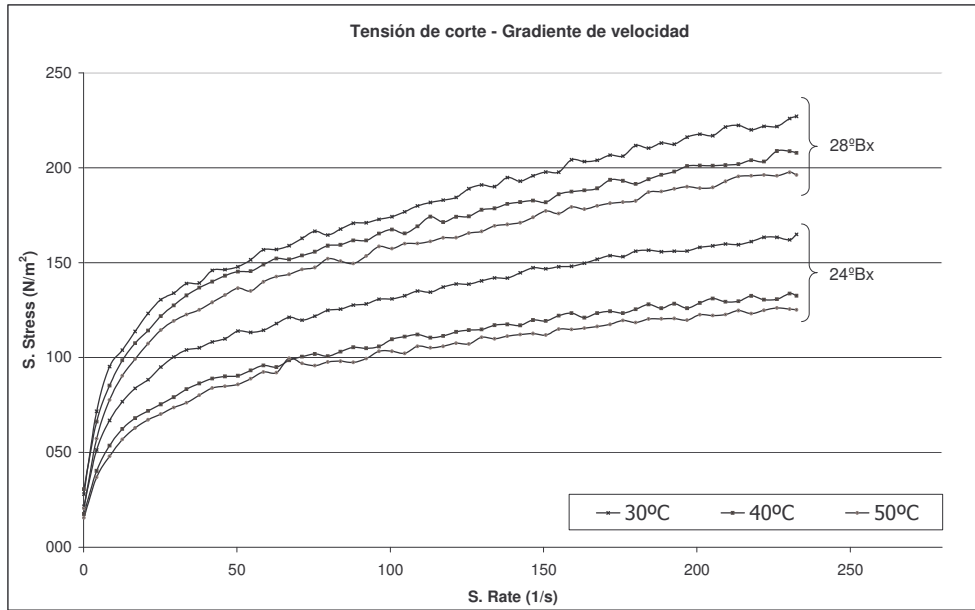


FIGURA 2. Valores experimentales de pulpas de pera a distintas temperaturas y 24 – 28°Bx.

Los resultados obtenidos utilizando la ecuación 2, se pueden observar en la Tabla 2.

TABLA 2. Resumen de constantes que describen el efecto de la concentración

T (°C)	K _C	a	R ²
30	1,79.10 ⁻⁰³	3,108	0,974
35	1,06.10 ⁻⁰³	3,251	0,989
40	5,18.10 ⁻⁰⁴	3,441	0,986
45	2,00.10 ⁻⁰⁴	3,520	0,947
50	1,63.10 ⁻⁰⁴	3,707	0,954
55	1,46.10 ⁻⁰⁴	3,764	0,934
60	1,28.10 ⁻⁰⁴	3,920	0,933
65	8,52.10 ⁻⁰⁵	4,030	0,943

El efecto combinado se describe entonces con:

$$\eta_{ap} = 3,125 \cdot 10^{-16} \cdot e^{(8825,9/T)} \cdot C^{a(t)} \cdot \dot{\gamma}^{(n_{(c)})-1} \quad (5)$$

Los valores de n_(c) se encuentran en la Tabla 3.

TABLA 3. Resumen de índices de comportamiento al flujo en función de la concentración

C (°Bx)	12,5	16	20	24	28
n_(c)	0,372	0,365	0,354	0,275	0,255

El análisis de los datos experimentales y los calculados con este modelo muestran resultados que permiten utilizar las ecuaciones propuestas.

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medidos y los calculados, se realizó un análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) entre las columnas de viscosidad aparente medida y la calculada. Los valores de $F < F_{crít}$ para todos los casos, muestran que no existen diferencias significativas entre las viscosidades medidas y las calculadas para las pulpas sobre las que se efectuaron las mediciones (datos no mostrados).

Actualmente se están efectuando nuevas mediciones, para mejorar el ajuste de las ecuaciones encontradas.

5. CONCLUSIONES

- El modelo de la ley de la Potencia para fluidos pseudoplásticos, es adecuado para describir el comportamiento al flujo de las pulpas de pera.

Se determinaron los valores del Índice de Consistencia K y de Comportamiento al Flujo n , para las distintas concentraciones a temperaturas de 30, 40 y 50° Centígrados, con coeficientes de determinación superiores a 0,93 en todos los casos.

- Para verificar los ajustes de correlación de las ecuaciones obtenidas, se calculó la viscosidad aparente para las temperaturas y concentraciones de sólidos solubles estudiadas usando las ecuaciones determinadas y los valores medios determinados. De los análisis efectuados se observa que no existen diferencias significativas entre la ecuación propuesta y los valores medidos.
- Las pulpas de pera tienen un comportamiento pseudoplástico lo que implica que, para cada concentración y temperatura, su viscosidad aparente disminuye, al aumentar la velocidad de deformación. Esto requiere que los efectos de la temperatura y de otras variables de proceso, sean evaluadas a distintas velocidades de deformación. Con el aumento de la velocidad de deformación decrece la viscosidad aparente y también la energía de activación. En los procesos de transferencia calórica el primer efecto es beneficioso, en tanto que el segundo no, ya que disminuye el umbral de eventuales daños térmicos. Por lo que deben buscarse las condiciones óptimas de velocidad de deformación y temperatura, en este análisis debe considerarse el eventual deterioro que sobre la calidad del producto puede producir el incremento de temperatura y además el incremento de potencia al aumentar la velocidad de deformación. Consideraciones similares deben hacerse en procesos de agitación y bombeo.
- La ecuación del efecto combinado propuesta ajusta bien con los valores experimentales para las condiciones estudiadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Crandall, P.G. y Nelson, P.E. (1975). Effects of preparation and milling on consistency of tomato juice and puree. *J. Food Sci*, Vol. 40, 710-713.
- Crandall, P.G., Chen, C.S. y Carter, R.D. (1982). Models for predicting viscosity of orange juice concentrate, *Food Technology*, Vol. 36 (5), 245-252.

- Fito, P.J., Clemente, G. y Sanz, F.J. (1983). Rheological behaviour of tomato concentrate (Hot break and Cold break). *J. Food Eng.*, Vol. 2, 51-62.
- Holdsworth, S.D. (1971). Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. *J. Text. Studies*, Vol. 2, 393-418.
- Rao, M.A. y Anantheswaram, R.C. (1982). Rheology of fluids. *Food Proc.*, Vol. 36, 116-126.
- Rao, M.A. (1986). Rheological properties of fluids foods. En *Engineering properties of foods*. (1986). Rao, M.A. y Rizvi, S.H., Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, 1-48.
- Saravacos, G.D. (1970). Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. *J. Food Sci.*, Vol. 35, 122-125.

ABSTRACT

Rheological and physicochemical analyses were conducted on different samples of pear pulps from Mendoza (Argentina) with the solid concentrations: 12.5, 16, 20, 24 and 28°Bx and temperatures: 30, 40 and 50°C. Besides, additional measures were done at other temperatures to calculate the Activation Energy values and study the effect of the solid soluble concentration on viscosity. All the assays showed that pear pulps corresponded to the Power Law Model for pseudoplastic fluids.

From these rheological determinations, a predictive equation for the apparent viscosity was obtained for pear pulps, as a function of the soluble solids concentration and the temperature.

There were no significant differences between the calculated and the measured values.

Key Words: pear- pulps- rheological parameters.