

ESTUDIO REOLÓGICO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE ACEITE DE MAÍZ

RHEOLOGICAL STUDY OF THE MANUFACTURING OF CORN OIL

OTONIEL CORZO, MARCOS SÁNCHEZ

*Departamento de Tecnología de Alimentos. Núcleo de Nueva Esparta.
Universidad de Oriente. Boca del Río. Venezuela. e-mail: otocorzo@cantv.net*

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento reológico de las diferentes corrientes aceitosas presentes en la refinación del aceite de maíz en una empresa venezolana. En tres días diferentes se tomaron muestras de las corrientes aceite crudo, crudo filtrado, crudo clarificado, aceite desgomado, aceite descerado, aceite decolorado, y aceite invernazado. Mediante un viscosímetro Brookfield con aguja No. 1 se determinó la viscosidad a 5, 10, 20, 50 y 100 RPM y varias temperaturas. Un análisis de varianza mostró que la viscosidad estaba afectada por la velocidad de rotación, indicando así un comportamiento de fluido no newtoniano. El coeficiente de consistencia (m) presentó valores desde 13,5 hasta 21,14 Pa sn y el índice de comportamiento de flujo (n) tuvo valores desde 1,18 hasta 1,25. Las características reológicas cambiaron ($p < 0,05$) con la temperatura y esta dependencia fue explicada por la ecuación de Arrhenius en un 87-97% con 95% de confianza. Estos resultados proporcionan una guía para el diseño óptimo de las operaciones unitarias del proceso.

PALABRAS CLAVE: Reología, Fluido no Newtoniano, Aceite de maíz.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the rheological behavior of the different oily currents involved in the refinement process of corn oil in a Venezuelan company. Samples of the currents (crude, filtrate crude, and clarify, ungummed, dewaxed, whitened, and invernazized oil) were taken at three different days. A Brookfield viscometer model RVT with needle #1 at speeds of rotation of 5, 10, 20, 50 and 100 rpm was used to determine viscosity at different temperatures. An analysis of variance showed that viscosity was affected ($p < 0.05$) by the speed of rotation indicating a behavior of non-Newtonian fluid. The consistency coefficient (k) ranged from 13.5 to 21.14 Pa sn and the flow behavior index (n) ranged from 1.18 to 1.25. The rheological characteristics changed ($p < 0.05$) with the temperature and the equation of Arrhenius explained 87-97% of its variability at a 95% confidence level. These results provide guidelines for an optimum design of operation units in the process.

KEY WORDS: Rheology, Non Newtonian fluid, Corn oil.

INTRODUCCIÓN

El aceite de maíz es un valioso subproducto de la industrialización de este cereal. Dadas las características del proceso de obtención, las empresas del sector no elaboran aceite en forma exclusiva, sino una gran variedad de productos que se obtienen de la molienda. Del germen del maíz se extrae un aceite crudo que luego se somete al proceso de refinación en el cual se generan corrientes aceitosas provenientes de cada etapa, tales como el aceite crudo filtrado, aceite crudo clarificado, aceite desgomado, aceite descerado, aceite decolorado y aceite invernazado, para obtener finalmente el aceite de maíz.

En este proceso se realizan operaciones unitarias tales como el bombeo, calentamiento y enfriamiento de las

corrientes aceitosas. En el diseño de las bombas que se requieren para trasladar un fluido desde una etapa a otra del proceso, o de los intercambiadores de calor utilizados para calentarlo o enfriarlo, es necesario conocer el tipo de fluido y su comportamiento reológico para lograr una operación eficiente y económica.

Los alimentos fluidos presentan características reológicas que van desde un simple comportamiento newtoniano (Nindo *et al.*, 2005; Zuritz *et al.*, 2005) a uno no newtoniano (Castro *et al.*, 1990; Ibanoglu y Ibanoglu, 1998; Vélez-Ruiz y Barbosa-Cánovas 1998) que puede ser dependiente o no del tiempo (Osorio 2001). Muchos alimentos se comportan como una combinación de materiales viscosos y elásticos (Barnes *et al.*, 1989), y los parámetros reológicos que los caracterizan en el caso de fluidos newtonianos es la viscosidad y en el caso

de los no newtonianos son el coeficiente de consistencia y el índice de comportamiento de flujo (Rao y Anatheswaran 1982).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento reológico de las diferentes corrientes aceitosas presentes en el proceso de refinación del aceite de maíz en una empresa venezolana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Toma de Muestras

Las muestras de las diferentes corrientes aceitosas durante el proceso de elaboración de aceite comestible derivado del maíz fueron tomadas de una empresa situada en la Encrucijada, estado Aragua, Venezuela. Durante el desarrollo de un mismo proceso de refinación y en tres momentos diferentes, se tomaron al azar muestras de 1,5 L en cada una de las corrientes aceitosas correspondiente a los aceites crudo, crudo filtrado, clarificado, desgomado, descerado, decolorado e invernidado. Este procedimiento se realizó durante tres procesos de refinación en días diferentes, para tener un total de nueve muestras totales de cada aceite.

Medición de las Propiedades Reológicas

Mediante un viscosímetro Brookfield modelo RVT (Brookfield Engineering Laboratories, Inc. Stoughton, Massachusetts, U. S. A.) con una aguja N° 1, se determinó la viscosidad aparente de cada muestra a diferentes velocidades de rotación (5, 10, 20,50 y 100 RPM) y diferentes temperaturas. Las temperaturas utilizadas correspondieron al rango del tratamiento térmico al cual cada corriente aceitosa se somete durante el proceso de elaboración del aceite de maíz, a saber, 35-40-45 °C para el aceite crudo, 35-45-55-65-75 °C para el aceite crudo filtrado, 55-60-65-70-75 °C para el aceite crudo filtrado, 55-60-65-70-75 °C para el aceite clarificado, 9-15-20-25-35-45-55-65-70 °C para el aceite desgomado, 30-50-70-90-110 °C para el aceite descerado, 15-20-25-30-35 °C para el aceite decolorado y 100-140 C-180 °C para el aceite invernidado. Cada determinación se realizó por triplicado.

A los datos obtenidos se les aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov y un análisis de varianza para determinar si la viscosidad de la corriente aceitosa variaba con la velocidad de rotación de la aguja a cada una de las temperaturas utilizadas. En caso afirmativo se utilizó la relación dada por Heldman y Singh (1993) para determinar los parámetros reológicos de la corriente aceitosa.

$$\log m = n \log(1/n) + \log k + (n-1) \log(4 \text{ p RPM}) = a + b \log(\text{RPM}) \quad (1)$$

Donde m es la viscosidad aparente, RPM es el número de revoluciones por minuto, n es el índice de comportamiento de flujo y m es el coeficiente de consistencia.

Análisis Estadístico

La normalidad de los datos de viscosidad fue determinada por aplicación de la prueba de Kolmogorov. Mediante un análisis de varianza se determinó la variación de la viscosidad aparente de cada corriente aceitosa con la velocidad de rotación de la aguja. Mediante regresión lineal simple se ajustaron los valores de la viscosidad aparente a la ecuación (1). La idoneidad del modelo se comprobó mediante un análisis de varianza considerando la normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuales. La influencia de la temperatura en los parámetros reológicos m y n , se determinó mediante un análisis de varianza. Para todos los análisis estadísticos se utilizó el paquete estadístico Statgraphics 5.0 plus (Statistical Graphics Corp., Rockville, Md., USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Reológicas

La prueba de Kolmogorov indicó que existía una distribución normal de los datos. El análisis de varianza encontró diferencias significativas ($p < 0,05$) en la viscosidad aparente de las diferentes corrientes aceitosas debidas a la velocidad de rotación de la aguja del viscosímetro, lo cuál indicó que las corrientes tenían un comportamiento de flujo correspondiente a un fluido no Newtoniano (Barnes *et al.*, 1989). El ajuste de los valores de la viscosidad aparente a la ecuación (1), por regresión lineal simple, presentó valores del coeficiente de regresión (R^2) mayores de 0,90 y los gráficos de residuales no mostraron evidencias fuertes de la violación de la normalidad, homocedasticidad e independencia de los mismos, indicando así su aplicabilidad para determinar el coeficiente de consistencia (m) y el índice de comportamiento de flujo (n). Los valores de m y n de las diferentes corrientes aceitosas a las distintas temperaturas se muestran en la Tabla 1. Los valores de n mayores a la unidad indicaron que las corrientes aceitosas tenían un comportamiento correspondiente a fluidos dilatantes (Muller 1973). Los valores de m disminuyeron ($p < 0,05$) al incrementar la temperatura mientras que los valores de n aumentaron ($p < 0,05$). La disminución en los valores de m en los aceites se debe a la mayor dispersión y desorden de las moléculas a causa de las altas temperaturas (Vélez-Ruiz y Barbosa-Cánovas 1998), con lo cual el aceite se hace menos viscoso. Dado que las diferentes corrientes

aceitosas se comportan como fluidos no Newtonianos y a la vez dilatantes, el cálculo correspondiente de las caídas de presión a través de las tuberías de transporte y de los intercambiadores de calor y de los coeficientes de transferencia de calor, se debe realizar utilizando las ecuaciones propias para este tipo de fluido. Esto permitirá

que las bombas requeridas para lograr el flujo de los aceites tengan la potencia adecuada y que los intercambiadores de calor diseñados para calentar o enfriar los aceites sean más eficientes en este objetivo. Se logra así una optimización de éstos equipos utilizados en el proceso de la elaboración del aceite de maíz.

Tabla 1. Coeficiente de consistencia (*m*) e índice de comportamiento de flujo (*n*) de las corrientes aceitosas producidas durante la elaboración de aceite de maíz.

Corriente aceitosa	Temperatura (°C)	<i>m</i> (Pa s ⁿ)	<i>n</i>	R ²
Aceite crudo	35	19,73	1,188	0,890
	40	13,85	1,234	0,933
	45	10,00	1,271	0,934
Aceite crudo filtrado	35	17,55	1,199	0,895
	45	8,46	1,296	0,933
	55	5,92	1,329	0,946
	65	4,14	1,361	0,946
	75	2,67	1,433	0,997
Aceite crudo clarificado	55	5,38	1,342	0,973
	60	4,39	1,375	0,980
	65	3,90	1,375	0,980
	70	2,99	1,412	0,981
	75	2,85	1,410	0,983
Aceite desgomado	9	102,58	1,053	0,928
	15	75,59	1,072	0,974
	20	73,80	1,077	0,943
	25	27,16	1,179	0,964
	35	18,47	1,198	0,912
	45	9,39	1,282	0,954
	55	6,25	1,321	0,947
	65	4,90	1,332	0,914
	75	3,14	1,395	0,980
	Aceite descerado	30	25,37	1,152
50		9,04	1,268	0,982
70		3,94	1,372	0,981
90		2,47	1,415	0,956
110		1,26	1,502	0,984
Aceite decolorado	15	72,76	1,081	0,963
	20	52,57	1,106	0,969
	25	31,88	1,173	0,966
	30	28,85	1,109	0,921
	35	21,14	1,182	0,908
Aceite invernazado	100	1,72	1,464	0,978
	140	0,44	1,725	0,920
	180	49,79	0,691	0,910

Efecto de la Temperatura

El análisis de varianza indicó que los valores de *m* y *n* diferían significativamente (p<0,05) por efecto de la temperatura. Para explicar esta dependencia se utilizó la ecuación de Arrhenius:

$$\ln (m, n) = \ln (k_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

Donde *k*₀ es el factor de frecuencia factor (min⁻¹), *E*_a es

la energía de activación (kJ/mol), R la constante universal de los gases (8,314 J/mol K) y T es la temperatura absoluta (K). La gráfica del logaritmo de la característica de flujo (*m* ó *n*) vs. 1/T resulta en una línea recta con la pendiente igual a *E*_a/R y el intercepto igual a ln (*k*₀).

El ajuste de los valores de *m* y *n* a la ecuación de Arrhenius mediante regresión lineal simple, indicó que ésta explicaba el 87-97% de la variabilidad de las características de flujo con la temperatura con un 95%

de confianza (Tablas 2 y 3), para todas las corrientes menos para m del aceite invernalizado y para n de los aceites decolorado e invernalizado. Estos resultados, coinciden con los obtenidos para la viscosidad de zumos de manzana (Schwartz y Costell 1989) y de jugo de uva (Zuritz *et al.*, 2005) siendo descritas por la ecuación de Arrhenius. Los valores del factor de frecuencia y de la energía de activación correspondientes a m y n de cada

corriente aceitosa se muestran en las Tablas 2 y 3. Un valor alto de E_a indica mayor sensibilidad de m ó n a la temperatura. Un análisis de varianza indicó que m ($E=53,36$ kJ/mol) y n ($E=5,30$ kJ/mol) para el aceite crudo era los más sensibles ($p<0,05$) a la temperatura, mientras que m ($E=31,01$ kJ/mol) y n ($E=2,44$ kJ/mol) para el aceite clarificado eran los menos sensibles, sin embargo m eran más sensible que n .

Tabla 2. Constantes de la ecuación de Arrhenius para el coeficiente de consistencia (m) de las corrientes aceitosas.

Corriente aceitosa	k_0	E_a (kJ/mol)	R^2
Aceite crudo	$1,826 \times 10^{-8}$	53,36	0,999
Aceite crudo filtrado	$1,614 \times 10^{-5}$	35,01	0,975
Aceite crudo clarificado	$6,614 \times 10^{-5}$	31,01	0,968
Aceite desgomado	$5,159 \times 10^{-7}$	44,88	0,974
Aceite descerado	$1,831 \times 10^{-5}$	35,44	0,974
Aceite decolorado	$4,942 \times 10^{-7}$	44,99	0,974

Tabla 3. Constantes de la ecuación de Arrhenius para el índice de comportamiento de flujo (n) de las corrientes aceitosas.

Corriente aceitosa	k_0	E_a (kJ/mol)	R^2
Aceite crudo	9.4080	-5,30	0,998
Aceite crudo filtrado	4.4360	-3,29	0,890
Aceite crudo clarificado	3.2923	-2,44	0,877
Aceite desgomado	4.8887	-3,61	0,877
Aceite descerado	4.0179	-3,12	0,985

CONCLUSIONES

Las diferentes corrientes aceitosas envueltas en el proceso de elaboración de aceite de maíz presentaron un comportamiento de flujo correspondiente a un fluido no Newtoniano y dilatante. Los parámetros reológicos m y n dependían de la temperatura lo cuál fue explicado por la ecuación de Arrhenius, siendo más sensible a los cambios de temperatura el valor de m y n para el aceite crudo. El conocimiento de este comportamiento permitirá un diseño óptimo de las bombas e intercambiadores de calor utilizados para calentar o enfriar las corrientes aceitosas del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES J., HUTTON F., WALTERS K. 1989. An introduction to rheology. Ellis Horwood Ltd, Chichester.

CASTRO E., ROJO O., MIRANDA M., SALAZAR J. 1990. Parámetros reológicos del néctar de manzana.

Alimentos. 15(4): 9-12.

HELDMAN DR, SINGH PR. 1993. Food process engineering, Avi Publishing Co., Inc., Westport.

IBANOGLU S, IBANOGLU E. 1998. Rheological characterization of some traditional Turkish soups. J. Food Eng. 35: 251-256.

MULLER K. 1973. Introducción a la reología de los alimentos, Editorial Acribia, Zaragoza.

NINDO CI., TANG J., POWERS R.O., SINGH P. 2005. Viscosity of blueberry and raspberry juice for processing applications. J. Food Eng. 69(3): 343-350.

OSORIO FA. 2001. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. En ALVARADO J. AGUILERA J. editores. Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza.

- RAO MA, ANATHESWARAN RC. 1982. Rheology of fluids in food processing. *Food Technol.* 36, 116-126.
- VÉLEZ-RUIZ JF, BARBOSA-CÁNOVAS GV. 1998. Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration temperature and storage time. *J. Food Eng.* 35: 177-190.
- SCHWARTZ M., COSTELL E. 1989. Influencia de la temperatura y de la concentración en la viscosidad de los zumos de manzana y de uva. *Rev. Agroquim. Technol. Aliment.* 29(2): 239-245.
- ZURITZ CA, MUÑOZ PUNTES E, MATHEY HH, PEREZ EH, GASCON A, RUBIO LA, CARULLO CA, CHERNIKOFF RE, CABEZA MS. 2005. Density, viscosity and coefficients of thermal expansion of clear grape juice at different solid concentrations and temperatures. *J. Food Eng.* 71(2): 143-149.