

Efecto de la temperatura y el rango de humedad en la energía de activación durante el secado de geles pécticos de tomate

Effect of temperature and moisture content range on the activation energy during drying of tomato leathers

Fiorentini C^{a,b}, Giner S A^{*a,b,c}

^aCentro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA), CONICET, Universidad Nacional de La Plata, 47 y 116 La Plata (B1900 AJJ), Argentina.

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

^cComisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

*Correos electrónicos: ce_fiore@yahoo.com.ar (Cecilia Fiorentini); saginer@ing.unlp.edu.ar (Sergio Giner)

RESUMEN

Los propósitos de este trabajo fueron comparar los valores de la energía de activación (E_a) de Arrhenius, que representa la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura durante el secado de geles pécticos de tomates, determinados por dos métodos: (1) correlación con la temperatura del aire y (2) con la temperatura media del producto. Se analiza el significado fisicoquímico en ambos casos. Se utilizó una formulación desarrollada para producir geles pécticos de tomate por deshidratación con aire a temperaturas de entre 40 y 80 °C. Las experiencias se realizaron en un secadero piloto de bandejas con pesada in situ, control de temperatura y de velocidad del aire. La humedad inicial de la formulación fue de 88% p/p, obteniéndose una lámina gelificada final con 35% p/p de textura flexible, adecuada para su consumo en pizzas y sándwiches. El producto se obtiene con una a_w de 0,85 y constituye un alimento funcional por la presencia del pigmento rojo licopeno, que exhibe propiedades antioxidantes y anticancerígenas. Además de las curvas de secado, se midieron las historias térmicas del producto con un termómetro infrarrojo sin contacto. Para cada temperatura del aire, la curva de humedad versus tiempo mostró una primera zona húmeda a tiempos cortos, con un comportamiento cuasilíneo, interpretado con la solución analítica de la ecuación difusiva considerando resistencias internas y externas a la transferencia de masa, determinando un Biot masa de 0,2. La correlación de la difusividad con la temperatura del aire permitió ajustar una E_a de 19,9 kJ/mol, valor similar al de otros autores. A tiempos largos (zona seca), la etapa fue controlada por la difusión interna de agua, utilizándose una solución analítica acorde para obtener una E_a de 25,4 kJ/mol, mayor que la de la zona húmeda. Esto discreparía con la teoría de Movilidad Molecular (Mm), que predice una mayor dependencia con la temperatura de procesos limitados por la difusión, a mayor contenido de agua. Se volvieron a correlacionar los coeficientes de difusión de la zona húmeda, ahora con la temperatura media del producto y se determinó una E_a de 41,6 kJ/mol, valor muy similar al calor de desorción de agua en alimentos, que es mucho mayor que la E_a de la zona seca, lo que reconciliaría así los resultados con la teoría de Movilidad molecular.

ABSTRACT

The purposes of this work were to compare the Arrhenius activation energies (E_a) during hot air drying of tomato leathers. This parameter, which represents the dependence of the diffusion coefficient with temperature, was determined by two methods (1) correlation of the diffusion coefficient with air temperature (2) correlation with the mean product temperature. The physical meaning of the results was analyzed for both methods. A previously developed formulation was converted in tomato leather by dehydration at air temperatures between 40 and 80 °C. The kinetic experiments were carried out in a pilot scale tray dryer with in situ weighing, and automatic control of air temperature and velocity. Moisture content of the formulation was 88% w/w, and the value for the finished flexible product was 35% p/p, which is suitable for using in pizza and sandwich. The leather has a water activity of 0.85 and constitutes a functional product owing to the presence of lycopene, a carotenoid responsible of the red color of tomato which, besides, possesses antioxidant and anticarcinogenic actions. Besides the drying curves, the product thermal histories were determined by a non contact infrared thermometer. In each experiment carried out at constant air temperature, the curve of average product moisture

content as a function of time showed first a "wet zone" where the decrease of moisture was quasilinear. This was interpreted by the analytical solution of diffusion considering internal and external resistances. A mass transfer Biot was determined to be 0.2. When the diffusion coefficient was correlated with air temperature, the activation energy resulted 19.9 kJ/mol, in agreement with previous authors. At long times ("dry zone"), the internal water diffusion controlled the drying rate, so an analytical solution for strict internal control was fitted to the data to obtain the diffusion coefficients. When these, in turn, were correlated with air temperature, the E_a was of 25.4 kJ/mol, higher than in the wet zone but in agreement with earlier work in other dry products. However, these results would not be in agreement with the Molecular Mobility theory (Mm), which predicts a stronger dependence of diffusion-limited processes when the moisture content is higher. In the wet zone, the diffusion coefficients were then correlated with the mean product temperature in that zone, which is more realistic if a constant temperature has to be chosen. The activation energy found was 41.6 kJ/mol, which is very close to the heat of desorption of water in foods and much higher than the activation energy of the dry zone. The latter correlation would reconcile results with the Mm theory and may contribute to a better understanding of drying kinetics in foods.

PALABRAS CLAVE: *geles de tomate, cinética, energía de activación, modelado.*

KEYWORDS: *tomato leather, kinetics, activation energy, modeling.*

INTRODUCCIÓN

El estudio de la cinética de secado de un producto brinda información útil para la industria de deshidratación de alimentos, y además contribuye para el diseño y simulación de secaderos (Ratti 2001). Los parámetros que se derivan de los estudios cinéticos, tales como los coeficientes de difusión del agua en la matriz del producto, pueden emplearse dentro de modelos de simulación para predecir el tiempo de secado y definir así las dimensiones de equipos en forma (Crapiste y Rotstein 1997).

La deshidratación de materiales frescos es un proceso complejo que involucra fenómenos de transferencia de masa y calor que ocurren simultáneamente en el interior del producto. La migración de humedad en el alimento durante el secado puede estar gobernada por una combinación de mecanismos, pero a temperaturas moderadas puede modelarse asumiendo difusión líquida. Pezzutti y Crapiste (1997), estudiando el secado de ajo, utilizaron una solución analítica de un término a la ecuación diferencial no estacionaria de difusión en sólidos que resulta dependiente del Biot y de raíces de una ecuación trigonométrica. Por otra parte, la gran mayoría de los investigadores del secado de alimentos, correlacionaron los coeficientes de difusión con la temperatura del aire de secado de sus estudios cinéticos (Zogzas *et al*, 1996). Este recurso puede resultar válido para alimentos de poca humedad, tales como los cereales, donde el sólido alcanza rápidamente el equilibrio térmico con el aire, pero no en alimentos frescos o de alta humedad, donde la temperatura media del producto durante el secado es claramente inferior a la del aire. Por tanto, la energía de activación que se ajusta con la ecuación tipo Arrhenius contra la inversa de la temperatura absoluta del aire, que representa la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura, no sería un valor representativo del proceso. Más aún, ese valor puede distorsionar las predicciones de consumo de combustible durante el secado, que dependen de la interrelación del tiempo de proceso y de la temperatura del aire de secado. El presente trabajo tiene como objetivos comparar los valores de la Energía de activación de Arrhenius (E_a), obtenida por medio de dos métodos: correlación con la temperatura del aire y correlación con la temperatura media del producto. Además, se compararán las E_a encontradas en zonas con distinto mecanismo gobernante del secado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de la Formulación

La formulación de los geles pécticos de tomate fue descrita en un trabajo previo (Fiorentini *et al*. 2008). El material inicial para el estudio de la cinética de secado presenta una consistencia líquida, con un contenido de humedad del 88,5 % w/w, o 7,69 kg agua/ kg materia seca.

Determinación de la temperatura y humedad ambiente

Las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente se midieron por medio de un psicrómetro desarrollado a tal fin, que consiste en un par de termómetros de mercurio. Estas lecturas se introdujeron como datos en el software Akton psychrometric (Akton Associates Inc., EUA) para calcular la humedad absoluta (ha) y relativa (hr) a la temperatura del aire de secado.

Determinación del contenido de humedad de la formulación

El contenido de humedad de la formulación ingresada al secadero se determinó por deshidratación en estufa-balanza Mettler LP 16 a 105 °C hasta pesada constante (Greensmith 1998, AOAC 1984). La muestra colocada pesaba 10 g. Esto involucra remover alrededor de 8,8 g de agua. La precisión de la balanza es similar a su resolución, 0,01 g de manera que el error esperado del método en esta medida es de $100 \times (0,01/8,8) = 0,11\%$. El valor determinado para la formulación es entonces de $88,5\% \pm 0,11/100$, es decir $88,5 \pm 0,10\%$, un error muy bajo.

Determinación de la actividad de agua

La determinación de la actividad de agua de la formulación y del producto final fueron obtenidas a 25°C por el método higrométrico en un Aqualab 3TE meter (Decagon Devices, Inc., EUA).

Técnica experimental de secado

La formulación fue ubicada en bandejas de acero inoxidable de 0,20 x 0,20 m de lado, con un espesor inicial de producto de 7,5 mm. Las muestras fueron ingresadas a un secador de bandejas a escala piloto con pesada in situ.

Mientras el contenido de humedad inicial de la formulación fue determinada en estufa como se describió, el resto de las humedades a los distintos tiempos de la curva de secado se calcularon por diferencias de pesada, empleando la siguiente expresión.

$$W = \left(\frac{1 + W_0}{m_0} \right) m - 1 \quad (1)$$

Donde W y m son el contenido de humedad (kg agua/kg material seca) y la masa del producto (kg), respectivamente, al tiempo t medidas en una balanza digital OHAUS (precisión 0,01 g, capacidad, 3000 g) mientras que W_0 y m_0 son los correspondientes valores iniciales.

Las curvas de temperatura del producto fueron obtenidas midiendo desde un orificio en la parte superior del secadero, con un termómetro infrarojo sin contacto Testo 830 T2 (Testo AG, Alemania) sobre la superficie del producto. Este orificio se encuentra normalmente cerrado con un tapón de polipropileno. A los tiempos de medida, el tapón se retiraba para tomar en pocos segundos varias lecturas y promediarlas. Las cinéticas de secado experimentales se realizaron en duplicado a cuatro temperaturas del aire de secado: 40, 50, 60 y 80 °C, con una velocidad de aire de $2,0 \pm 0,05$ m/s. Las temperaturas del aire se mantuvieron constantes mediante un controlador proporcional por tiempo, en alrededor de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ del valor deseado. Para medir la variable controlada, el dispositivo electrónico emplea una termo resistencia Pt-100. La potencia se suministró uniformemente a todas las resistencias aleteadas (Potencia total instalada, 14,4 kW) a efectos de lograr un calentamiento homogéneo del aire en la sección transversal del equipo de secado.

El valor de la humedad de equilibrio experimental a las condiciones de secado, W_e , fue medido por prolongación del secado hasta un peso estable (24 a 36 h desde el comienzo del secado).

Túnel de secado a escala piloto

En la **Figura 1** se muestra un diagrama esquemático del secadero de bandejas utilizado para el estudio cinético, con las referencias de cada una de las partes.

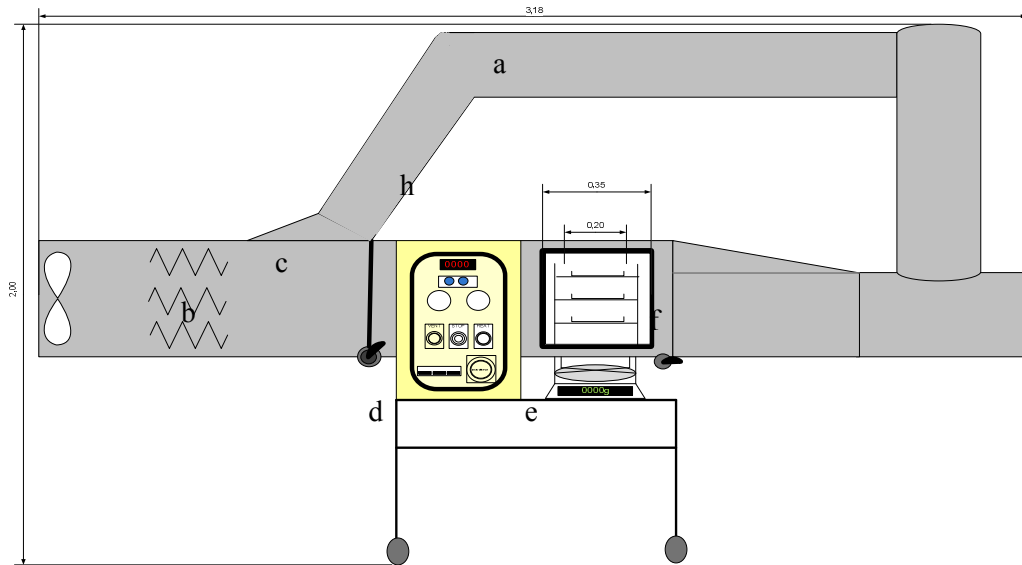


Figura 1. Equipo de secado. Descripción de las partes: a. Conducto paralelo de derivación, b. Resistencias internas de calentamiento del aire, c. Deflector de derivación, d. Control automático de temperatura del aire y de velocidad de aire, e. Balanza digital de precisión, f. Cámara de secado aislada térmicamente, g. Sensores de temperatura del aire, h. Orificio para tomar medidas de temperatura sin contacto.

Modelado de la zona húmeda de la curva de secado

La “zona húmeda” de cada curva de secado fue definida basándose en las curvas de las historias térmicas (**Figura 2**). Éstas muestran dos comportamientos aproximadamente asintóticos: el primero, desde la temperatura inicial, hasta un valor intermedio correspondiente a un período de secado aparentemente constante, mientras el segundo, comienza cuando hay un “quiebre” en la curva de temperatura y la pendiente de calentamiento vuelve a subir, para posteriormente tender a un nuevo valor de la asíntota, la temperatura del aire de secado. El tiempo para el cual aumenta la pendiente de la curva de temperatura, luego del primer comportamiento asintótico, puede considerarse como el punto final de la “zona húmeda” de la curva de secado. Esta duración de la “zona húmeda” para cada experiencia de secado, corresponde a un rango de humedad adimensional $0,3 \leq W_{ad} \leq 1$ (**Figura 3**).

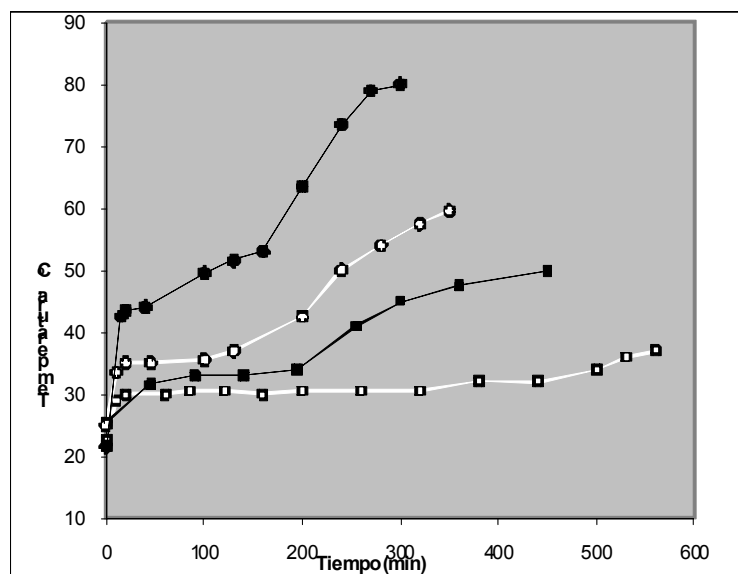


Figura 2. Historias térmicas del producto durante el secado, correspondientes a las curvas de la Figura 2, para temperaturas de aire de 40 (□), 50 (■), 60 (○) y 80°C (●).

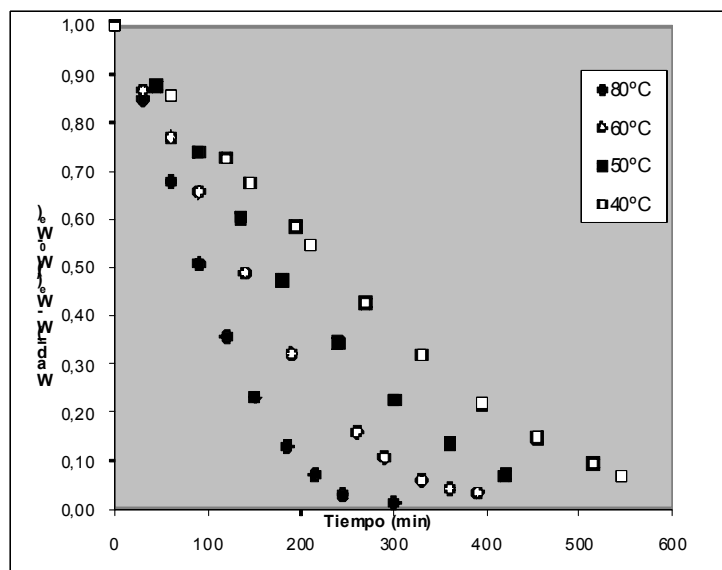


Figura 3. Humedades adimensionales de producto en función del tiempo. Las curvas de secado se midieron a 40 (□), 50 (■), 60 (○) y 80 °C (●).

La solución analítica que expresa el contenido de humedad promedio del producto en función del tiempo para la situación general donde ambas resistencias, interna y externa son importantes, fue utilizada para la “zona húmeda”. Se empleó un software estadístico para ajustar el modelo por medio de una regresión no lineal de los datos experimentales (Systat, Inc), siendo el coeficiente de difusión efectivo y el número de Biot los parámetros de ajuste para cada curva medida a una temperatura de aire constante.

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Bi_m^2 \exp\left[\frac{-\beta_n^2 D_{zh} t}{d_{zh}^2}\right]}{(\beta_n^2 + Bi_m^2 + Bi_m) \beta_n^2} \quad (2)$$

D_{zh} y d_{zh} son el coeficiente de difusión efectivo del agua en el laminado de tomate y el espesor medio laminado en la zona húmeda, respectivamente. El símbolo β_n representa a las raíces de la ecuación trascendente escrita debajo, que es dependiente del número de Biot para la transferencia de masa, Bi_m (Crank 1975),

$$f(\beta_n) = \beta_n \operatorname{tg}(\beta_n) - Bi_m = 0 \quad (3)$$

Esta ecuación ha sido poco utilizada en la literatura, posiblemente por falta de información sobre la forma más práctica de emplearla y la relativamente nueva disponibilidad de software potente para el ajuste de parámetros de ecuaciones de cierta complejidad.

En este sentido, mediante un programa Matlab se comprobó que el uso de dos términos resulta suficiente para tener una precisión comparable a la de la serie infinita

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = 2 \left[\frac{Bi_m^2 \exp\left[\frac{-\beta_1^2 D_{zh} t}{d_{zh}^2}\right]}{(\beta_1^2 + Bi_m^2 + Bi_m) \beta_1^2} + \frac{Bi_m^2 \exp\left[\frac{-\beta_2^2 D_{zh} t}{d_{zh}^2}\right]}{(\beta_2^2 + Bi_m^2 + Bi_m) \beta_2^2} \right] \quad (4)$$

La relación matemática entre las raíces β_i y el Número de Biot de masa que se desarrollaron en un trabajo previo (Leiva Díaz *et al.* 2009) en base a la información provista por Crank (1975), se emplearon para el ajuste de la ecuación (4) a los datos experimentales.

Modelado de la zona seca de la curva de secado

El secado en la zona de baja humedad ($W_{ad} \leq 0,3$) se encuentra gobernado por un control interno estricto (difusivo) a la transferencia de masa. Por este motivo, se empleó la solución analítica Ec (5), una serie infinita convergente.

$$W_{ad} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{zs} t}{4 d_{zs}^2}\right) \quad (5)$$

donde D_{zs} y d_{zs} representan el coeficiente de difusión y el espesor promedio de la zona seca, respectivamente. En esta zona se ubican los datos de humedad adimensional menor que 0,3, por lo cual sólo un término es suficiente para la convergencia. De esta manera, es posible ajustar la ecuación en la forma semi logarítmica siguiente (Ec. (6))

$$\ln W_{ad} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{zs}}{4 d_{zs}^2}\right) t \quad (6)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se observó que los dos primeros términos de la serie de la Ecuación (2) predecían la curva del contenido de humedad adimensional vs. tiempo con una precisión similar a la obtenida con los seis términos utilizados en un trabajo previo (Fiorentini *et al.* 2008). Por lo tanto, se empleó la versión simplificada que permitió el ajuste del número de Biot y el coeficiente de difusión, a cada temperatura de aire utilizando el software estadístico Systat (Systat, 1990). Se encontró un valor óptimo de Biot de 0,2 para todas las temperaturas en la zona “húmeda” de la curva de secado, que predice una línea casi recta, con una resistencia interna a la transferencia de masa que es baja pero no despreciable. Si bien el espesor inicial de la formulación para el secado fue de 7,5 mm, el espesor promedio calculado con un modelo de contracción volumétrica para el contenido de humedad promedio en la zona húmeda (Fiorentini *et al.* 2008), fueron los siguientes: 40 °C, 5,0 mm; 50 °C, 4,8 mm; 60 °C, 4,6 mm; 80 °C, 4,7 mm. La humedad promedio en cada curva experimental se calculó numéricamente en Matlab mediante la expresión siguiente, que surge del teorema del valor medio para integrales:

$$W_m = \frac{1}{t_{zh}} \int_0^{t_{zh}} W(t) dt \quad (7)$$

donde los valores de $W(t)$ son las humedades experimentales del producto al tiempo t , mientras que t_{zh} es la duración de la zona húmeda.

Cálculo de la temperatura media de producto en la zona húmeda

La temperatura media del producto en la zona húmeda se calculó por medio de la ecuación siguiente, basada en la igualación de la entalpía media del producto en la zona húmeda y la integración de la entalpía instantánea durante ese período, aplicando nuevamente el teorema del valor medio para integrales y la humedad media calculada con la ecuación (7).

$$T_m = \frac{1}{(C_{ps} + C_{pw} W_m) t_{zh}} \int_0^{t_{zh}} (C_{ps} + C_{pw} W(t)) T(t) dt \quad (8)$$

En la **Tabla 1**, se listan los coeficientes de difusión y números de Biot ajustados a los datos de la curva de secado (**Figura 3**) en la zona húmeda, junto a los valores de la temperatura del aire de secado y la temperatura media del producto, calculada con la Ec. (8). La **Figura 4** es un gráfico tipo Arrhenius

para la zona húmeda, donde el coeficiente de difusión se representó en función de la temperatura del aire y del valor medio en el producto. En el primer caso, la energía de activación fue de 19,9 kJ/mol, mientras que en el segundo, de mayor pendiente, de 41,6 kJ/mol. Dado que la temperatura media se considera más representativa a la hora de referir los resultados a un valor constante, es altamente posible que el valor más alto de la energía de activación sea un valor con mayor fundamento. Más aún, existe una gran similitud entre el valor más alto de la E_a y el calor de desorción de agua en el alimento, que es del orden de 40 kJ/mol.

Tabla 1. Valores del coeficiente de difusión para la zona húmeda (D_{zh}), de la curva de secado de geles pécticos de tomate junto a sus correspondientes desviación estándar y coeficiente de correlación de la ecuación tipo Arrhenius a distintas temperaturas de aire y temperatura media de producto

T_a , °C	T_m , °C	Bi_m	D_{zh} m ² /s	$s(D_{zh})$ m ² /s	r^2
40	30,0	0,2	$6,3238 \times 10^{-9}$	$0,169 \times 10^{-9}$	0,999
50	31,8	0,2	$7,6225 \times 10^{-9}$	$0,405 \times 10^{-9}$	0,999
60	35,4	0,2	$9,6238 \times 10^{-9}$	$0,567 \times 10^{-9}$	0,998
80	45,7	0,2	$14,876 \times 10^{-9}$	$1,09 \times 10^{-9}$	0,997

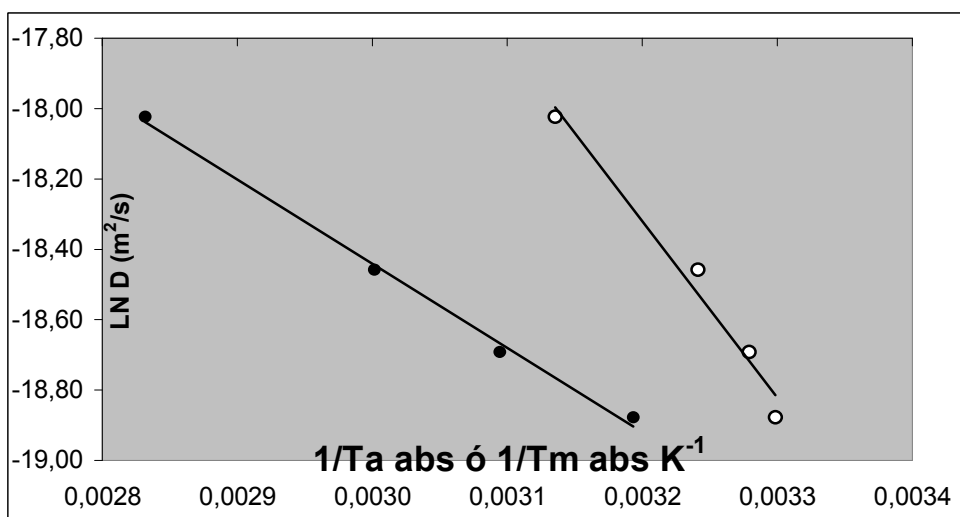


Figura 4. Correlación entre el coeficiente de difusión con la temperatura del aire (●) y la temperatura media del producto (○) para la zona húmeda.

La **Tabla 2** muestra los resultados de los ajustes de la ecuación (6) a los datos experimentales de la curva de secado en la zona seca. La **Figura 5**, muestra los valores del coeficiente de difusión en la zona seca, éstos son de un orden de magnitud menores que los de la zona húmeda, lo cual está de acuerdo con los datos obtenidos por otros investigadores en otros alimentos (Pezzuti y Crapiste 1997). La energía de activación de la ecuación tipo Arrhenius para esta zona se calculó correlacionando los coeficientes de difusión con la temperatura del aire, y resultó de 25,4 kJ/mol. Es posible que este valor, menor al obtenido en la zona húmeda para la correlación con la temperatura media, esté de acuerdo con que los procesos limitados por difusión presentan menor dependencia con la temperatura, a menor contenido de humedad (Roos 1995)

En la **Figura 6**, se muestra una comparación de la correlación en cada zona, observándose que en la zona seca los procesos de difusión son más lentos por producirse a bajos contenidos de humedad.

Tabla 2. Valores del coeficiente de difusión para la zona seca (D_{zs}), junto a sus correspondientes desviación estándar y coeficiente de correlación de la ecuación tipo Arrhenius a distintas temperaturas de aire

T_a , °C	D_{zs} m ² /s	$s(D_{zs})$ m ² /s	r^2
40	$0,980 \times 10^{-10}$	$0,07 \times 10^{-10}$	0,983
50	$1,256 \times 10^{-10}$	$0,116 \times 10^{-10}$	0,980
60	$1,935 \times 10^{-10}$	$0,088 \times 10^{-10}$	0,993
80	$2,865 \times 10^{-10}$	$0,027 \times 10^{-10}$	0,978

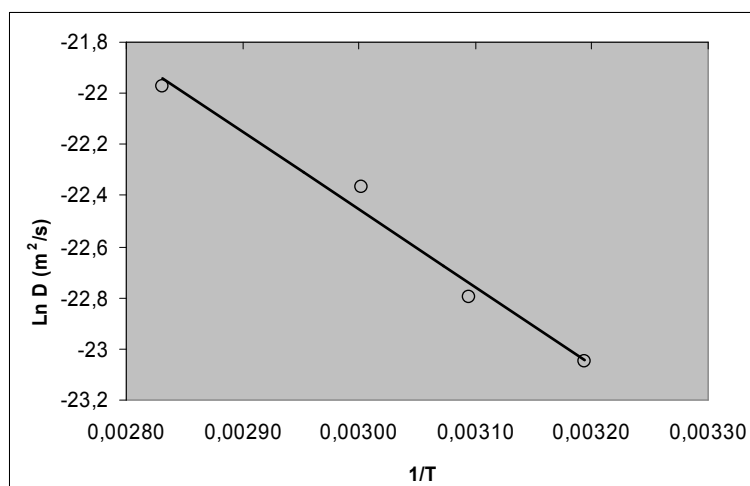


Figura 5. correlación entre el coeficiente de difusión y la temperatura del aire para la zona seca.

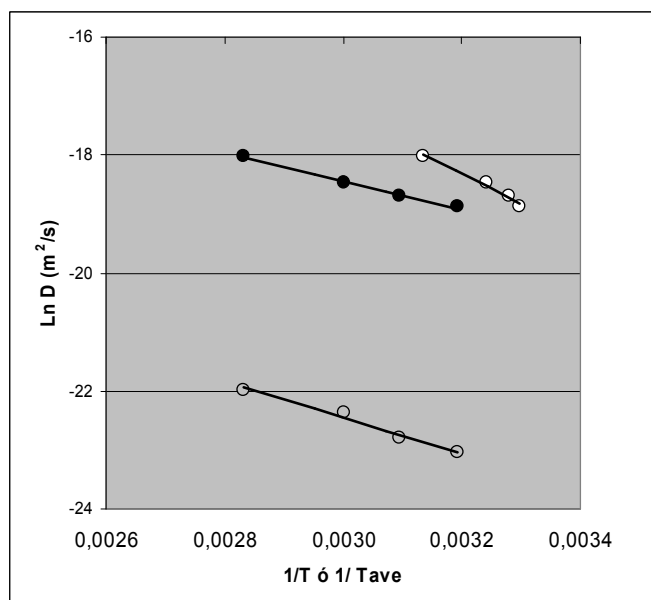


Figura 6. Correlaciones de las Figuras 4 y 5, graficadas conjuntamente: Coeficientes de difusión para las zonas húmeda en función de la temperatura del aire (●) y de la temperatura media del producto (○). Correlación del coeficiente de difusión de la zona seca(●), con la temperatura del aire.

CONCLUSIONES

La E_a determinada correlacionando el coeficiente de difusión de la zona húmeda con la temperatura del aire, fue de 19,9 kJ/mol. Es el método convencional y su valor es comparable al de otros alimentos vegetales de alta humedad.

Al correlacionar los mismos coeficientes con la temperatura media del producto en la zona húmeda, se obtiene una E_a de 41,6 kJ/mol. Se considera que este valor tiene más sentido físico por provenir de una correlación con la temperatura media del producto

El valor de E_a determinado al correlacionar el coeficiente de difusión de la zona seca con la temperatura del aire fue 25,4 kJ/mol. Esta parte del secado ocurre a una temperatura más próxima a la del aire

Las diferencia de E_a entre 41,6 y 25,4 kJ/mol concordaría con la teoría de la Movilidad Molecular, que predice un efecto más débil de la temperatura en los procesos difusionales que se desarrollan a bajos contenidos de agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las entidades siguientes por el respaldo recibido: Comisión de Investigaciones Científicas, CICPBA, CONICET, Universidad Nacional de La Plata, y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC (1984). *Official methods of analysis* (14th ed.). Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists.

Crank J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd edn, Oxford, UK:Oxford Clarendon Press.

Crapiste GH, Rotstein E. (1997). Design and performance evaluation of dryers. In: Valentas K.J., Rotstein E. and Singh R.P. (eds), *Handbook of Food Engineering Practice 4*. Boca Raton, New York: CRC Press, pp. 125–165.

Fiorentini C, Leiva Díaz E, Giner SA. (2008). A Mass Transfer Model for the Drying of an Innovative Tomato Gel. *Food Science and Technology International*. Vol 13, issue 6.

Greensmith M. (1998). *Practical Dehydration*, 2nd edn, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd.

Leiva Díaz E, Giannuzzi L, Giner SA. (2009) Apple pectic gel produced by dehydration. *Food and Bioprocess Technology* 2 (2), 194-207

Pezzutti A, Crapiste GH. (1997). Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic. *Journal of Food Engineering*, 31(1), 113-123

Ratti C. (2001). Hot air and freeze drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering* 49: 311–319.

Roos YH. (1995). *Phase transitions in foods*. Academic Press, Inc., San Diego, New York, Boston.

Systat (1990). *Systat 5.02* for Windows, Systat, Inc., Evanston IL, USA 60201

Zogzas NP, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2254.

Efecto de la liofilización sobre la viscosidad aparente de la pulparefinada de mango (*Mangifera indica* L.)

Effect of the liofilitation in the viscosity aparent in pulp refinate mango (*Mangifera indica* L.)

González C (1), Soto N (1)

(1) Laboratorio de Procesos Agroindustriales. Programa Ingeniería Agroindustrial.
Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela
cesargonzalez@ucla.edu.ve

RESUMEN

La presente investigación describe el comportamiento reológico de la pulpa de mango (*Mangifera indica* L.) a través de la determinación de su viscosidad aparente y al mismo tiempo persigue esclarecer si el proceso de liofilización incide en dicho parámetro reológico. La metodología utilizada se fundamentó en la construcción de reogramas a partir de mediciones de la viscosidad aparente en muestras de pulpa refinada fresca, y muestras de pulpa refinada, liofilizada y reconstituida (incorporación del contenido de humedad extraído). Para lo cual se empleó un viscosímetro Brookfield LVD. Los reogramas obtenidos permitieron definir el comportamiento pseudoplástico de ambas pulpas, así como visualizar una disminución de los valores de viscosidad aparente experimentados por las muestras liofilizadas y reconstituidas. Para el análisis de los resultados se utilizó el paquete estadístico Statgraphycs Centurion versión XV Plus, con el cual se analizó la varianza de las viscosidades aparentes obtenidas (antes y después del tratamiento), corroborando la diferencia significativa en la viscosidad aparente de las pulpas en estudio.

ABSTRACT

This research describes the rheological behavior of the mango pulp (*Mangifera indica* L.) through the determination of their apparent viscosity at the same time tries to clarify whether the lyophilization (**Freeze-Drying**) process impinges on this parameter rheological. The methodology used was based on the construction of reograms from measurements of the viscosity apparent in samples of fresh pulp refined, and samples of refined pulp, freeze-dried and reconstituted (incorporating the moisture content extracted). For that which is used a viscosimeter Brookfield LVD. The reogramas earned helped to define the pseudoplastic behaviour of both pulp, as well as displaying a decrease in viscosity experienced by the apparent freeze-dried and reconstituted samples. To analyze the results using the statistical package Statgraphycs Centurion Plus version XV, which analyzed the variance of apparent viscosities obtained (before and after treatment), corroborating the significant difference in the apparent viscosity of the pulp in study.

PALABRAS CLAVE: *reología, fluido, consistencia, deshidratación, reconstitución.*

KEYWORDS: *rheology, fluid, consistency, dehydration, reconstitution.*

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L) es una fruta tropical muy popular en Venezuela, tanto para consumo fresco como para procesamiento y obtención de diversos productos. Esta gran aceptación se debe a su valor comercial, digestibilidad, palatabilidad, sabor agradable y valor nutritivo. Debido a la gran aceptación, se requiere una información más detallada sobre las características de su pulpa y establecer los atributos que definan su calidad de acuerdo a su comercialización.

Por otro lado, el estudio de las características reológicas de un producto alimenticio es de suma importancia en la actualidad. Éste además de contribuir al conocimiento de la estructura del producto analizado, permite a la agroindustria controlar los procesos involucrados en la elaboración de alimentos, al efectuar frecuentemente medidas reológicas sobre las materias primas y flujos en

proceso, enfocadas en la aceptación del producto por parte del consumidor. Así mismo presta una valiosa ayuda en el diseño de la maquinaria requerida, al precisar el tipo de tolvas, tuberías, bombas, entre otros, que más se adecua a las características del producto utilizado.

Se han registrado numerosas investigaciones orientadas al estudio reológico de pulpas de frutas. Entre las publicaciones revisadas destaca el estudio realizado por Ramos *et al.* (2006), quienes caracterizaron las propiedades viscoelásticas de pulpa de membrillo a diferentes concentraciones de sólidos solubles. El estudio fue realizado en el rango de concentraciones de 12,3 a 28 °Brix. Los resultados demostraron un predominio del carácter viscoso sobre el carácter elástico de la pulpa de 16 a 20 °Brix.

En otro orden de ideas, el proceso de liofilización ha sido de gran utilidad en la actualidad como método de conservación de diversos alimentos, al prolongar en gran medida la vida útil del producto, ofreciendo las mismas cualidades organolépticas y valor nutritivo del alimento fresco. Se han reunido esfuerzos en las últimas décadas para comprobar con éxito la conservación de sustancias termolábiles una vez que el producto ha sido sometido a una etapa de deshidratación por medio de la liofilización.

En relación a este punto, Rotsteint *et al.* (1983) mencionan que la dificultad y baja rehidratación de manzanas deshidratadas es explicado por el cierre de los poros durante el colapso celular durante la deshidratación, en contraste la liofilización muestra una rápida rehidratación debido a que los poros permanecen intactos al no verse afectados por el método de sublimación.

Por último, Zambrano *et al.* (2007) realizaron un estudio del efecto de la temperatura sobre la cinética, el coeficiente de difusión y la adición de ácido cítrico y cloruro de sodio sobre la rehidratación de zanahorias liofilizadas. Los resultados obtenidos afirman que las variables de mayor influencia sobre la rehidratación son el contenido de ácido cítrico, la temperatura y la concentración de ácido cítrico, a los niveles estudiados.

Es por ello que la presente investigación se enfoca en esclarecer si existen otros efectos colaterales en la aplicación del mencionado método de conservación, más concretamente sobre la viscosidad aparente de la pulpa refinada de mango, con el propósito de que las mismas sean conocidas y tomadas en cuenta a la hora de seleccionar y diseñar las condiciones de operación más adecuadas en procesos en donde involucren dicha tecnología, como una contribución al conocimiento de las pulpas de las frutas producidas y procesadas en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevo a cabo en 3 etapas: en la primera, se caracterizó el comportamiento reológico de la pulpa refinada de mango de la variedad “bocado”, recién extraída (sin tratamiento) a través de la construcción de reogramas en base a mediciones de viscosidad aparente. Una segunda etapa, en donde se caracterizó el comportamiento reológico de la pulpa refinada de mango de la variedad “bocado” tratada, definiendo el tratamiento como: deshidratación por liofilización y posterior reconstitución de las muestras (incorporación del agua extraída); lo cual permitió identificar si el proceso de liofilización genera una variación de la viscosidad aparente de la pulpa en estudio. Por último, durante la etapa 3 se corroboraron los resultados obtenidos aplicando análisis estadístico, dicho procedimiento permitió confirmar si las muestras tratadas se diferencian significativamente de las no tratadas. A continuación se describe cada una de las actividades involucradas en la ejecución de la investigación durante la realización de las diferentes etapas.

Toma y selección de las muestras

Para el desarrollo de la investigación se emplearon mangos (*Mangifera indica L.*) de la variedad “bocado”. La selección de los frutos se realizó de manera visual, siguiendo una escala de color elaborada con anterioridad, solo los frutos similares al patrón 5 de la mencionada escala fueron elegidos. Se escogió el patrón 5 de la escala por 2 razones: la primera, por representar el fruto fisiológicamente maduro, pero aún de textura firme, evitando de esta manera que el traslado o la manipulación originara algún daño en el lote; y en segundo lugar, para garantizar el procesamiento del fruto el día siguiente en su estado de madurez óptima.

Obtención de la pulpa refinada

Para la elaboración de la pulpa refinada de mango se empleó una despulpadora marca SPRINMATIC (de 10 kg de capacidad). Asimismo se empleó un tamiz de acero inoxidable malla 65 (por lo que las perforaciones en el tamiz tenían un diámetro de 2 mm). La despulpadora fue alimentada con mangos

pelados manualmente. El tiempo de despulpado fue estandarizado con anterioridad, estableciendo 5 minutos de procesamiento.

Acondicionamiento de las muestras

El acondicionamiento de las muestras se fundamentó en cuatro pasos: acidificación, estandarización de los grados Brix, empaquetado y congelación.

Acidificación. Para garantizar la inactivación enzimática y cualquier actividad microbiana que pudiera incidir en la variación de la viscosidad de las muestras durante su manipulación, se disminuyó el pH de las muestras a un valor de 3,5; para lo cual se añadió una solución de ácido cítrico saturada al 50 %.

Estandarización de los grados Brix. La pulpa extraída arrojó en cada uno de los ensayos una concentración promedio de 18 °Brix. Solo en el ensayo en donde se determinó el efecto del tratamiento sobre la concentración de las muestras, fue necesaria la dilución de las mismas, hasta alcanzar valores de 10, 12, 14 y 16 °Brix. La dilución se efectuó añadiendo agua destilada según cálculos de balance de materia realizados para ajustar la concentración al valor deseado.

Empaque y congelación. Las muestras fueron empaquetadas en bolsas de polietileno provistas de cierre hermético. Una vez selladas e identificadas se introdujeron de forma horizontal (formando una delgada capa) en una cava de congelación la cual las mantuvo a una temperatura de -20 °C. El tiempo de congelación total en los diferentes lotes procesados varió entre 20 a 26 horas.

Cabe destacar que la etapa de congelación, solo fue aplicada a las muestras a liofilizar, es decir, para determinar el comportamiento reológico y el cálculo de la viscosidad aparente de la pulpa fresca (sin tratamiento) se empleó pulpa acondicionada inmediatamente después de ser refinada.

Tratamiento de las muestras

Liofilización de las muestras. Para la aplicación del tratamiento se empleó un liofilizador marca: LABCONCO modelo Lyph-lock 6. Las muestras congeladas fueron troceadas manualmente, realizando el menor daño posible, e introducidas en los recipientes de 900 mL de capacidad del liofilizador. Durante el llenado de los recipientes los trozos de pulpa congelada se introdujeron de forma suelta dejando espacios vacíos entre los trozos para aumentar la eficiencia del tratamiento. Una vez llenado los envases (hasta $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad) fueron pesados (dicho peso menos el peso de la tara o recipiente vacío permitió determinar el peso de pulpa a liofilizar)

El tratamiento de liofilización de las muestras en el equipo descrito se llevó a cabo a -45°C y 7 a 20 x 10⁻³ M Bar.

La finalización del tratamiento fue indicada por la activación de la alarma del liofilizador, estableciendo una duración del tratamiento entre 56 a 60 horas. El equipo deshidrató cada una de las muestras hasta que las mismas alcanzaron un porcentaje de humedad igual a 3%. Dicho valor se determinó empleando un analizador de humedad Marca Ohaus, modelo MB45.

Reconstitución de las muestras. La adición de agua para la hidratación de las muestras liofilizadas fue determinada por diferencia de peso; por lo cual fue necesario pesar las muestras de pulpa de mango refinada justo antes del tratamiento de liofilización y una vez liofilizadas. Al restar ambas masas se calculó la cantidad de agua extraída en la operación de deshidratación. Una vez agregada la cantidad de agua determinada teóricamente, la concentración fue corroborada mediante la medición de los grados Brix de la muestra empleando para ello un refractómetro portátil.

Para lograr la hidratación, fue necesario sumergir los trozos de pulpa liofilizados en el agua destilada por espacio de 20 minutos. Seguidamente se continuó el procedimiento establecido para la medición de la viscosidad que se describe a continuación.

Medición de la viscosidad aparente

Para determinar la viscosidad aparente de las muestras se identificaron en primer lugar, las condiciones de operación del viscosímetro Brookfield LVD empleado. A través de ensayos preliminares se estableció tanto el eje del viscosímetro que corresponda al tipo de fluido, los cuales fueron ejes 62 y 63; así como las diferentes R.P.M. (velocidad de rotación) a las cuales el equipo arroje lectura.

Entre los criterios tomados en consideración para la selección de las velocidades de rotación figuran en primer lugar, los parámetros empleados por Medina y Pagano (2001); en segundo lugar se tomó en cuenta la velocidad de lectura arrojada por el equipo, ya que las lecturas mostradas en el mismo a 20-30 RPM se mostraban claramente y a una rapidez que permitían detener la rotación del eje. Asimismo, se estableció una temperatura de las muestras fija durante todas las determinaciones de viscosidad realizadas, la cual fue de 25 °C (valor comúnmente empleado en la consulta bibliográfica realizada).

Para mantener las muestras a una temperatura constante (25 °C) se empleó un baño termostatado, Marca: PreciS Term.

Cabe destacar que para cada uno de los ensayos realizados, se emplearon 3 muestras, la lectura de viscosidad aparente en cada uno de ellas fue realizada por triplicado, lo que permitió obtener un promedio de las 3 lecturas de viscosidad por cada parámetro analizado en cada una de las muestras individualmente. Dicho valor fue el utilizado para la realización de diferentes representaciones gráficas.

Fase I.- Caracterización del comportamiento reológico de la pulpa de mango refinada fresca

Para distinguir el comportamiento reológico de las muestras se procedió a identificar en cuál de las categorías pertenece el producto en estudio. En primer lugar se determinó la viscosidad aparente de muestras de pulpa de mango a diferentes intensidades de cortadura (velocidad de deformación); las cuales fueron: 4, 5, 6, 10, 12, 20, 30 y 50 RPM, cada lectura de viscosidad (variando las RPM) se realizó a un mismo intervalo de tiempo, dejando transcurrir 2 minutos entre cada lectura. Se verificó la temperatura del fluido en cada medición la cual fue de 25 °C. Con los datos obtenidos se representó gráficamente la viscosidad aparente (η) en Centipoise versus la velocidad de deformación (D) en RPM; según la conducta descrita, se definió a cuál de las categorías de comportamiento no newtoniano corresponde (plástico, pseudoplástico o dilatante).

Seguidamente se realizó un estudio del comportamiento dependiente del tiempo de la muestra, para ello, se realizaron mediciones de viscosidad aparente igualmente recién despulpadas, manteniendo la misma velocidad de deformación (20 RPM) dejando transcurrir 10 minutos entre una lectura y otra. Se tomaron un total de 20 lecturas, por lo que se realizaron mediciones de viscosidad durante 200 minutos. Los valores obtenidos sirvieron para representar gráficamente la viscosidad aparente en función de t ; según el comportamiento ilustrado en la gráfica se precisará si el fluido en estudio describe un comportamiento de un fluido tixotrópico o reopéctico.

Fase II. Caracterización del comportamiento reológico de la pulpa de mango liofilizada y reconstituida

Para la caracterización reológica de las muestras de pulpa de mango liofilizadas se siguió la metodología detallada anteriormente para la caracterización reológica de pulpa de mango refinada recién extraída, es decir, se realizaron mediciones de viscosidad aparente en muestras de pulpa de mango liofilizadas y reconstituidas (hidratadas) a diferentes intensidades de cortadura o velocidad de deformación; y manteniendo la misma velocidad de deformación (20 RPM) dejando transcurrir 10 minutos entre una lectura y otra.

Fase III. Comparación de los valores de viscosidad aparente registrados por las muestras antes y después del tratamiento

Los valores obtenidos en la fase II fueron comparados con los valores de viscosidad aparente de las pulpas frescas (fase I). La representación gráfica de ambos ensayos y el análisis estadístico de los resultados realizado permitieron determinar si existió o no diferencias significativas entre la viscosidad aparente de la pulpa de mango fresca y la viscosidad aparente de la pulpa de mango liofilizada y reconstituida.

Por otro lado, se contempló un ensayo, en el cual se estudió el efecto de la concentración de las muestras sobre el tratamiento (liofilización y reconstitución), para ello se contemplaron 5 muestras con diferentes concentraciones, a 10, 12, 14, 16 y 18 °Brix. A las cuales se les determinó la viscosidad aparente antes y después del tratamiento. Igualmente fueron elaborados los reogramas correspondientes de cada una de las muestras a diferentes concentraciones, representando gráficamente el valor obtenido antes y después del tratamiento; lo que permitió visualizar si el efecto tiene mayor incidencia en muestras con concentraciones menos elevadas.

Fase IV. Análisis estadístico de los resultados

En primer lugar, se corroboró el cumplimiento de los supuestos básicos (normalidad, aditividad y homogeneidad de varianzas) de los datos obtenidos en los diferentes ensayos. Para ello fue necesario el empleo de las siguientes pruebas: Prueba de Ji – Cuadrado de bondad de ajuste (para el Supuesto de Normalidad) y la Prueba de Pearson y Hartley (para el supuesto de homogeneidad de varianzas).

El sistema de hipótesis para el análisis del efecto del tratamiento se estableció de la siguiente manera:

H_0 : $\mu\eta$ antes del tratamiento = $\mu\eta$ después del tratamiento contra H_1 : $\mu\eta$ antes del tratamiento \neq $\mu\eta$ después del tratamiento

En segundo lugar, para determinar si existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de viscosidad aparente de las muestras antes y después del tratamiento, se optó por el análisis de la varianza, empleando para ello el software Statgraphics Centurion versión XV, en el cual se utilizó ANOVA de un solo factor y ANOVA multifactorial, en los dos tipos de comparaciones realizadas, las cuales se describen a continuación:

1) Comparación de cada una de las muestras antes y después del tratamiento a diferentes concentraciones: en este primer análisis se compararon los valores de viscosidad aparente registrados por cada una de las muestras (a cada una de las concentraciones estudiadas) antes y después del tratamiento, estableciendo de esta forma 5 comparaciones, constituidas por cada una de las muestras a las cinco diferentes concentraciones (10, 12, 14, 16 y 18 °Brix). Para dicha comparación se empleó ANOVA de un solo factor (definiendo el factor como el tratamiento).

2) Comparación del efecto de las concentraciones sobre los valores de viscosidad aparente antes y después del tratamiento: para corroborar si las concentraciones tuvieron una influencia en el efecto del tratamiento, fueron comparadas simultáneamente los cinco pares de muestras (a diferentes concentraciones, antes y después del tratamiento). Para la realización de dicha comparación fue necesario el empleo del método ANOVA multifactorial, en donde se establecieron 2 factores:

Factor 1: la concentración de las muestras (es decir 1=10 °Brix, 2=12 °Brix, 3=14 °Brix, 4=16 °Brix y 5=18 °Brix)

Factor 2: el tratamiento (definiendo 1 = antes del tratamiento y 2 = después del tratamiento)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de la viscosidad aparente con variación de la velocidad de deformación en muestras de pulpa refinada de mango sin tratamiento.

En base a los valores viscosidad aparente de cada una de las muestras se construyó la **Figura 1**, en esta se destaca la variación de la viscosidad aparente de las muestras al ser sometidas a diferentes velocidades de deformación. En él, se puede apreciar dos aspectos: en primer lugar el fluido, en este caso pulpa refinada de mango, presenta, como era de suponerse, variaciones en los valores de viscosidad aparente al ser sometido a diferentes velocidades de deformación (η varía con respecto a D). Esto permite afirmar que la pulpa refinada de mango se comporta como un fluido no newtoniano, tal y como los resultados presentados en las investigaciones realizadas por Muñoz *et al.* (2000) y Medina *et al.* (2001), al analizar pulpas de fruta de consistencia similar.

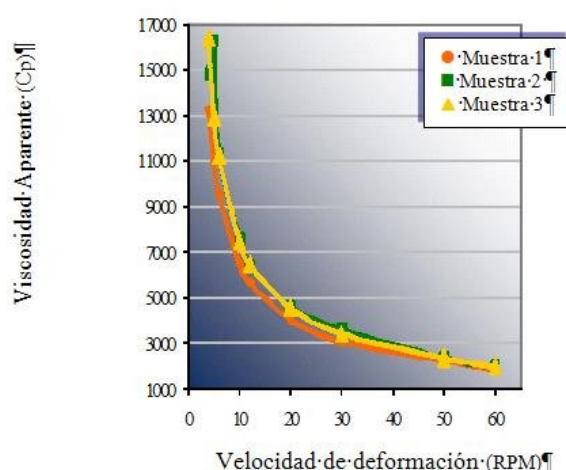


Figura 1. Curva de fluidez de las muestras, en donde se aprecia los valores de viscosidad aparente a diferentes velocidades de deformación

Nota: los valores de viscosidad presentados, representa el promedio obtenido de las muestras procesadas (ya que cada una de ellas fue evaluada por triplicado), las muestras presentadas poseían una concentración de sólidos igual a 18%.

En segundo lugar, puede distinguirse un descenso de la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de deformación, definiendo de esta manera, el comportamiento pseudoplástico de la pulpa refinada de mango; lo que permite inferir que la viscosidad aparente depende de la velocidad de deformación por cizalladura, pero no del tiempo durante el cual están sometidos a la tensión cizallante. Ambos fenómenos fueron experimentados por las 3 muestras (representadas en el gráfico con las líneas naranja, amarillo y verde), y como puede apreciarse, con valores de viscosidad muy similares. Usualmente los homogeneizados de las pulpas de frutas exhiben este comportamiento, y en muchos casos puede atribuirse a la presencia de sustancias de alto peso molecular en solución y/o a los sólidos dispersos en la fase líquida, tal y como lo señala Fellows (1994). Las líneas de tendencia representadas en la **Figura 2**, describen el espesamiento dependiente del tiempo experimentado por las muestras (la viscosidad aparente de las muestras en estudio aumenta a medida que pasa el tiempo), por lo que la pulpa refinada de mango, al igual que los resultados obtenidos por Medina *et al.* 2001 durante la caracterización de pulpa de guayaba, puede caracterizarse como un fluido reopéctico.

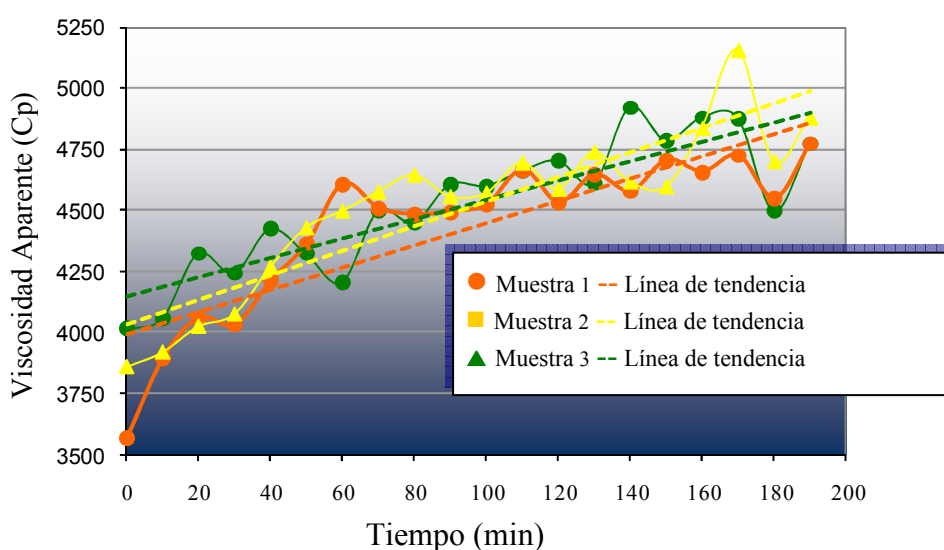


Figura 2. Curva de fluidez de las muestras, en donde se indican los valores promedio de viscosidad aparente realizadas a un intervalo fijo de tiempo.

Nota: los valores de viscosidad presentados, representa el promedio obtenido de las muestras procesadas (ya que cada una de ellas fue evaluada por triplicado), las muestras presentadas poseían una concentración de sólidos solubles igual a 18%.

Medición de la viscosidad aparente con variación de la velocidad de deformación en muestras de pulpa refinada de mango liofilizadas y reconstituidas.

Una vez aplicado el tratamiento así como la reconstitución de las muestras se determinó la viscosidad aparente de las mismas en función a la velocidad de deformación. Cabe destacar la división de fases experimentado por las muestras al transcurrir el tiempo, visualizando pulpas de consistencia heterogénea; dichos resultados se asemejan a los obtenidos por Viñas (1977), quien estudió la reconstitución de mezclas a base de cromógenos de fresa y pulpa de uva.

En la **Figura 3**, se destaca la variación de la viscosidad aparente de las muestras al ser sometidas a diferentes velocidades de deformación. Asimismo, se puede corroborar el patrón reológico del fluido en estudio, pulpa refinada de mango liofilizada y reconstituida, el cual permanece describiendo un comportamiento de un fluido no newtoniano, de tipo pseudoplástico, tal y como los resultados descritos por Viñas 1977, en su estudio de pulpa de fresa y uva liofilizada.

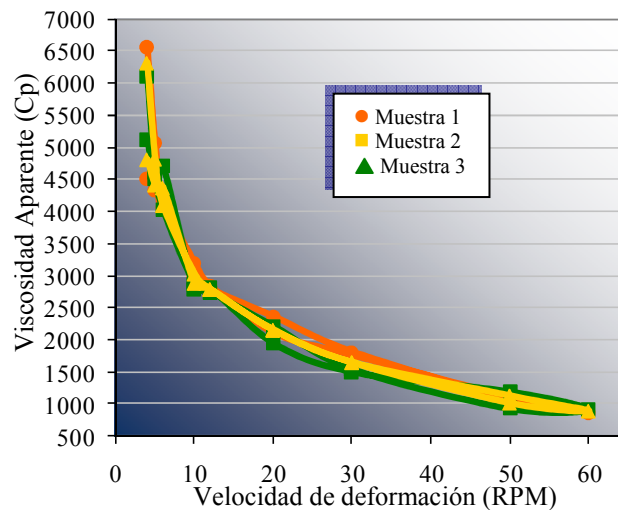


Figura 3. Curva de fluidez de las muestras, en donde se aprecia los valores de viscosidad aparente a diferentes velocidades de deformación.

Nota: los valores de viscosidad presentados, representa el promedio obtenido de las muestras procesadas (ya que cada una de ellas fue evaluada por triplicado), las muestras presentadas poseían una concentración de sólidos solubles igual a 18%.

Medición de la viscosidad aparente en el tiempo empleando una velocidad de deformación fija en muestras de pulpa refinada de mango liofilizadas y reconstituidas.

Como se muestra en la **Figura 4**, las muestras tratadas (liofilizadas y reconstituidas) presentan un patrón de viscosidad aparente variable en el tiempo, ya que los valores de viscosidad registrados en el transcurso del tiempo no tienen una tendencia clara. Observando las líneas de tendencia de las muestras, se aprecia una inclinación de estas líneas orientadas hacia abajo en los primeros 100 min, lo que evidencia una disminución de los valores de viscosidad aparente, trascurrido dicho tiempo el valor de viscosidad aparente tiende a mantenerse relativamente constante. En este caso, no se puede asegurar que el fluido en estudio (pulpa refinada de mango liofilizada y reconstituida) presenta un comportamiento de un fluido tixotrópico, dado la variabilidad de los valores de viscosidad registrados, es por ello que se debe considerar la realización de un nuevo ensayo, en el cual se estudie a fondo el comportamiento de la viscosidad de la pulpa refinada de mango en el tiempo.

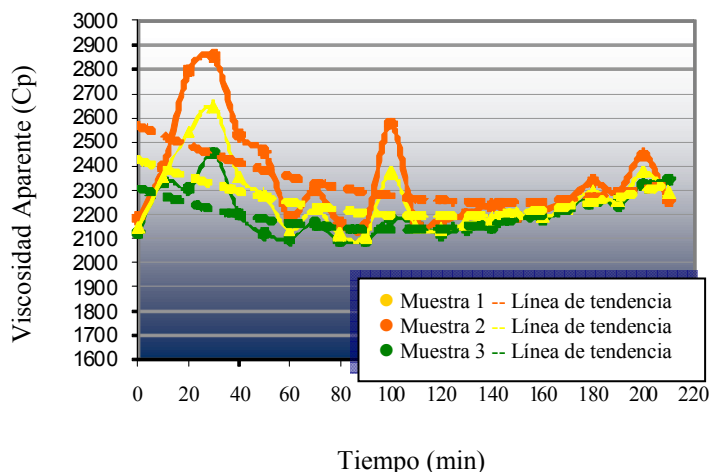


Figura 4. Curva de fluidez de las muestras, en donde se indican los valores promedio de viscosidad aparente realizadas a un intervalo fijo de tiempo.

Nota: los valores de viscosidad presentados, representa el promedio obtenido de las muestras procesadas (ya que cada una de ellas fue evaluada por triplicado), las muestras presentadas poseían una concentración de sólidos solubles igual a 18%.

Comparación del comportamiento reológico de las muestras de pulpa de mango refinada antes y después del tratamiento.

Para comparar el comportamiento reológico de las muestras de pulpa refinada de mango antes y después del tratamiento se construyeron los gráficos mostrados en la **Figuras 5 y 6**.

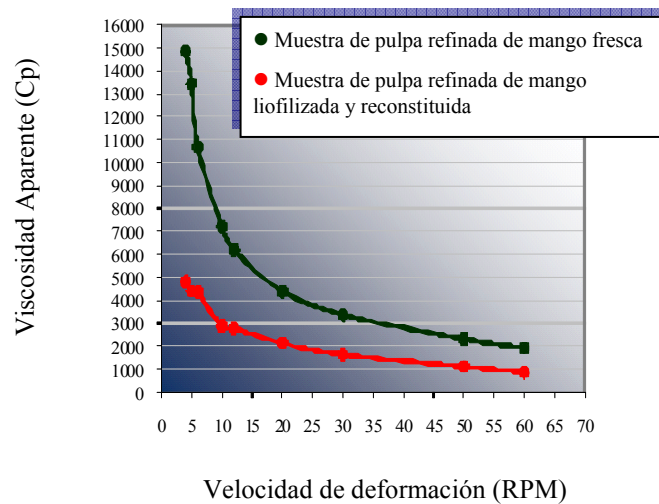


Figura 5. Comparación de las viscosidades aparentes a diferentes velocidades de deformación antes y después del tratamiento.

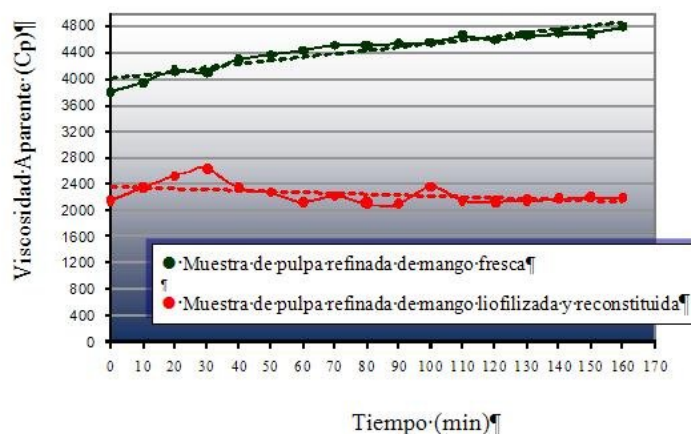


Figura 6. Comparación de las viscosidades aparentes a velocidad de deformación constante y a un intervalo fijo de tiempo antes y después del tratamiento.

En ambos gráficos puede apreciarse un marcado descenso de la viscosidad aparente experimentado por las muestras de pulpa refinada de mango liofilizadas y reconstituidas al cotejarlas con muestras frescas (no tratadas), hecho que evidencia el efecto del tratamiento sobre la estructura de las muestras.

Medición de la viscosidad aparente en muestras de pulpa de mango antes y después del tratamiento a diferentes concentraciones.

En base a los valores de viscosidad aparente obtenidos de cada una de las muestras a diferentes concentraciones antes y después del tratamiento se construyó la **Figura 7**. Dicho gráfico, presenta la variación de viscosidad aparente experimentado por las muestras a diferentes concentraciones luego de ser aplicado el tratamiento (liofilización y reconstitución), las líneas de tendencia en el gráfico nos permiten visualizar el aumento de la viscosidad aparente a medida que aumenta la concentración de las muestras, por lo que se puede inferir que el efecto del tratamiento se acentúa a mayor concentración de sólidos solubles en las muestras de pulpa de mango liofilizadas y reconstituidas.

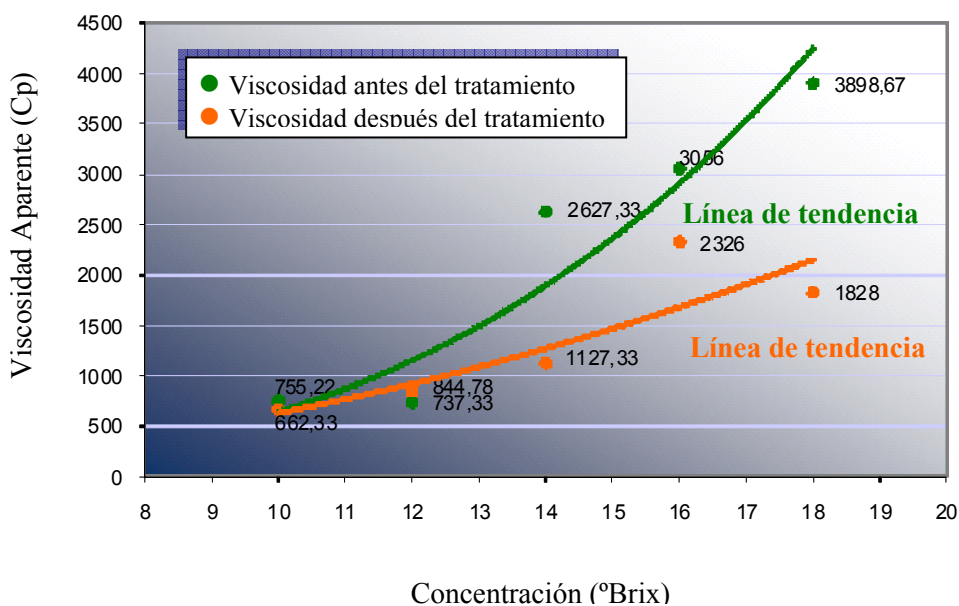


Figura 7. Valores de viscosidad aparente a diferentes concentraciones antes y después del tratamiento.

Análisis estadístico de las muestras de pulpa refinada de mango a 10, 12, 14, 16 y 18 °Brix

Los resultados arrojados por el programa para cada una de las muestras a diferentes concentraciones (analizadas de forma individual) presentan un P-valor de la F-test inferior a 0,001; lo que permite afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los valores de viscosidad aparente de pulpa refinada de mango antes y después de liofilizar y reconstituir a 10, 12, 14, 16 y 18 °Brix, con un nivel de confianza del 95%.

Análisis estadístico de las muestras de pulpa refinada de mango a diferentes concentraciones antes y después del tratamiento

Los P-valores arrojados por el paquete estadístico prueban la significación estadística de cada uno de los factores, ya que los 2 P-valores son inferiores a 0,001; por lo que puede afirmarse que ambos efectos (tanto el tratamiento, como la concentración) tienen un efecto estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 99,0%.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento reológico de la pulpa refinada de mango fresca y liofilizada, se derivan las siguientes conclusiones:

La viscosidad aparente de la pulpa de mango depende de la velocidad de corte, por lo tanto es un fluido no newtoniano; y disminuye con el aumento en la velocidad de rotación, por lo cual, la pulpa refinada de mango se clasifica como un fluido no newtoniano con características pseudoplásticas. Asimismo, al analizar los valores de viscosidad aparente en el tiempo, la pulpa refinada de mango se comporta como un fluido reopéctico.

Las muestras de pulpa refinada de mango sometidas a una deshidratación por liofilización y una posterior reconstitución de la humedad removida pueden caracterizarse reológicamente como un fluido pseudoplástico. Al representar sus valores de viscosidad aparente a una velocidad de deformación fija a intervalos de tiempo, no se aprecia el espesamiento característico, como el experimentado por la pulpa refinada de mango sin tratamiento.

Del efecto de la liofilización sobre la viscosidad aparente en pulpa refinada de mango se puede concluir:

La deshidratación por liofilización generó un descenso en el valor de su viscosidad aparente. Este efecto se acentúa cuanto mayor es la concentración de sólidos solubles de la pulpa.

El análisis estadístico aplicado reafirma los resultados gráficos obtenidos, por lo que se puede aseverar, con un porcentaje de confiabilidad de 95%, que se presentaron diferencias estadísticamente

significativas en los valores de viscosidad aparente en pulpa refinada de mango antes y después de ser sometida a un proceso de deshidratación por liofilización bajo diferentes concentraciones 10, 12, 14, 16 y 18° Brix. Asimismo, el análisis de varianza realizado permitió afirmar que ambos efectos (tratamiento y concentración) tienen un efecto estadísticamente significativo con un nivel de confianza igualmente del 95%.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados, se puede afirmar que el proceso de deshidratación por liofilización genera una modificación en la estructura de la pulpa refinada de mango lo que ocasiona dificultad para su reconstitución, al ser llevadas nuevamente a su concentración original. Este hecho fue constatado al evidenciar una significativa reducción en los valores de viscosidad aparente registrados por las pulpas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Comisión Venezolana de Normas Industriales. (1978). Norma N° 21818. Determinación de viscosidad. FONDONORMA, Caracas, Venezuela.

Fellows P. (1994). Tecnología del procesado de los alimentos, principios y prácticas. 2da ed. Zaragoza: Editorial Acribia S.A. Pag 162

Rotstein E, Lozano J, Urbicain, M. (1983). *Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content*. Journal of Food Science, New York and London, v. 48, n. 5, p. 1497-1502.

Medina MY, Pagano F. (2001) *Caracterización de la pulpa de guayaba (Psidium guajava L.) tipo "Criolla Roja"*. Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela (UCV); Volumen 20 Número 1. Caracas, Venezuela.

Ramos AY, Ibarz A. (2006). *Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles*. Cienc. Tecnol. Aliment., Campinas, V. 26, N°1. [Documento en línea]. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612006000100034&lng=es&nrm=iso. [Consulta: 19 Febrero 2008].

Viñas A. (1977). *Estudio del proceso de liofilización de distintas mezclas de cromógenos en especial el de fresa con zumo de uva y la influencia de las pectinas en el comportamiento reológico de las mezclas y de la liofilización*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Zambrano M, Rodríguez DY, Álvarez A. (2006). *Estudio cinético y de superficie de respuesta para la rehidratación de zanahorias (Daucus carota) liofilizadas*. Revista Información Tecnológica, Volumen 18, Número 4-2007. México. [Revista en línea]. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=scipdf&pid=S0718-07642007000400008&lng=es&nrm=iso&tlng> [Consulta: 2008, Enero 10].