

COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE MASA DURANTE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE LA GUAYABA

Gloria Panadés*¹, Déborah Castro², Yanía Aguiar², Pedro Fito³, Amparo Chiralt³ y Víctor Acosta¹

¹Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria,
Carretera al Guatao, km 3½, La Habana, Cuba, C.P. 19200.

²Instituto Carlos J. Finlay, La Habana, Cuba

³Dpto. Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, España.

E-mail: gloria@iiaa.edu.cu

RESUMEN

Se determinaron los coeficientes globales de transferencia de agua (K^*) y sólidos (K) de la guayaba deshidratada osmóticamente. Los segmentos de la fruta fueron tratados en una solución de sacarosa a 65 °BRIX. Se ensayaron tres temperaturas, 30, 40 y 50 °C, seis tiempos, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min y tres regímenes de presión (P), atmosférica, vacío pulsante (5 min a vacío y posteriormente presión atmosférica) y vacío continuo. Los coeficientes K^* y K se calcularon ajustando los datos experimentales a un modelo matemático que toma en consideración la relación lineal entre los contenidos normalizados de agua y sólidos frente a la raíz cuadrada del tiempo. Se comprobó que los coeficientes globales de transferencia de materia dependen del régimen de presión y la temperatura. Los mayores valores de K^* se alcanzaron a 50 °C y los de K se lograron a vacío pulsante y 40 °C.

Palabras clave: guayaba, deshidratación osmótica, coeficiente global de transferencia de masa.

ABSTRACT

Global mass transfer coefficients in osmotic dehydration of guava

The global water (K^*) and solids (K) transfer coefficients of osmotically dehydrated guava were determined. Fruit segments were immersed in a 65 °BRIX sucrose solution. Three temperatures: 30, 40 and 50°C for 30, 60, 90, 120, 150 and 180 min and three pressure regimens: atmospheric, pulsed vacuum (5 min under vacuum and then atmospheric pressure) and continuous vacuum were tested. K^* and K coefficients were calculated by fitting the experimental data to a mathematical model relating the ratios of the standardized water and solids contents to the square root of time. The global mass transfer coefficients were proven to be functions of the pressure regimen and temperature. The highest K^* values were reached at 50°C and the highest K values were achieved with pulsed vacuum at 40°C.

Key words: guava, osmotic dehydration, global mass transfer coefficient.

INTRODUCCIÓN

En el secado osmótico la presión de trabajo está relacionada con tratamientos bajo condiciones de presión atmosférica (PA), vacío continuo (V) y vacío pulsante (VP) (corto tiempo de vacío al inicio del tratamiento y posteriormente presión atmosférica). En las tres variantes la difusión de agua a través de las membranas celulares es el mecanismo de transporte predominante durante el proceso, aunque también aparecen solapados otros mecanismos difusionales y capilares en los espacios intercelulares (poros) del tejido.

Según estudios realizados, la cinética del proceso se intensifica en condiciones de vacío (1-6), lo que se debe a la transferencia de materia que tiene lugar por me-

***Gloria Panadés Ambrosio:** Ingeniera en alimentos (Instituto Superior Politécnico de Krasnodar; Rusia, 1982). Investigador titular. Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos (Universidad Politécnica de Valencia, 2000). Perteneció a la Dirección de Vegetales. Labora en el Departamento de Tecnología. Sus principales líneas de trabajo son el envasado aséptico de alimentos, conservación de vegetales por métodos combinados, procesamiento mínimo de frutas y hortalizas y deshidratación osmótica de frutas.

canismo hidrodinámico (HDM) (3,5-7). El HDM ha sido descrito y modelado (3,6) como un mecanismo de transferencia de materia que ocurre en los tratamientos a vacío a consecuencia de los cambios de presión ocurridos en el sistema y que se traduce en un aumento de la superficie de contacto sólido-líquido dentro de los poros del producto tratado. Este se desarrolla principalmente cuando se restaura la presión atmosférica en el sistema, después de un corto período de tratamiento a vacío. Teniendo en cuenta esto, la alternativa del vacío pulsante ofrece buenas perspectivas pues con resultados similares a los obtenidos a vacío continuo, origina menor consumo de energía porque el proceso se realiza la mayor parte del tiempo a presión atmosférica (2).

La generalidad de los modelos existentes que explican la transferencia de materia en la DO asume que el mecanismo controlante es la difusión y aplican la segunda ley de Fick en estado no estacionario y flujo unidireccional para describir el proceso. Crank (8) propuso soluciones analíticas para las distintas geometrías (lámina infinita, cilindro infinito y esfera), obteniéndose distintas soluciones simplificadas que permiten estimar difusividades aparentes o efectivas en los distintos estadios de tratamiento.

En base al modelo simplificado de la segunda ley de Fick y las soluciones analíticas de Crank (8), Hawkes y Flink (4) desarrollan un modelo basado en la relación lineal existente entre el contenido normalizado de sólidos (CNS), definido como el cociente entre los sólidos finales e iniciales del producto, y la raíz cuadrada del tiempo, obteniendo un coeficiente global (K) de transferencia de masa.

Dalla Rosa y col. (1) retoman las expresiones de Hawkes y Flink (4) añadiendo el concepto del contenido normalizado de agua (CNA), descrito como el cociente entre la humedad final y la inicial del producto, y logran un coeficiente global de transferencia de agua (K^*). Ambos coeficientes (K y K^*) son globales o efectivos, pues la transferencia simultánea de materia se reduce al transporte individual de agua o soluto. Estos mayormente se utilizan para establecer comparaciones entre los diferentes sistemas de alimentos y pueden ser útiles para determinar la composición final del producto.

El objetivo de este estudio consistió en determinar los coeficientes globales de transferencia de agua (K^*) y sólidos (K) de la guayaba deshidratada osmóticamente a presión atmosférica, vacío pulsante y vacío continuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio, las guayabas (*Psidium guajaba L.*) var. Enana Roja, procedentes de la Estación Nacional de Frutales de la provincia Habana, se seleccionaron en estado maduro duro, atendiendo a la clasificación establecida al respecto en la norma cubana (9) y con un tamaño entre 53 y 59 mm de diámetro para garantizar el tamaño homogéneo de las muestras. Las frutas se pelaron, cortaron en mitades, descorazonaron y picaron en octavos

Para la deshidratación osmótica, los segmentos de guayaba se pesaron en fracciones de 110 g (alrededor de 12 segmentos) e introdujeron en un matraz de 1 L que contenía 880 g de una solución de sacarosa a 65 °BRIX. Seguidamente, el matraz se colocó dentro de un baño de agua termostataado a la temperatura de la experiencia, acopló a un evaporador rotatorio al vacío a una velocidad de rotación de 100 rev/min y sometió a distintos regímenes de presión durante un tiempo determinado.

Se ensayaron tres temperaturas (T), 30, 40 y 50 °C, seis tiempos totales (t), 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min y tres regímenes de presión (P), atmosférica, vacío pulsante y vacío continuo. Para el régimen de vacío pulsante se empleó un tiempo a vacío de 5 min. Las presiones de vacío del sistema fueron las de la presión de vapor del jarabe, correspondiente a cada temperatura estudiada: 30 °C - 4,3 kPa; 40 °C - 5,2 kPa; 50 °C - 10,7 kPa (10).

Después de cada tratamiento las muestras se escurrieron y enjuagaron con agua destilada durante 30 s para eliminar el sirope adherido a la superficie de la fruta, se secaron con papel de filtro y pesaron. En cada experiencia se determinó el contenido de humedad gravimétricamente empleando una estufa al vacío para el secado de la muestra hasta peso constante a 60 °C (11). También se midió el contenido de sólidos solubles refractométricamente. Todos los análisis se hicieron por triplicado.

Los coeficientes globales de transferencia de materia (K^* y K) se determinaron según los modelos simplificados de la ley de Fick (8) propuestos por otros autores (1,4):

$$CNA = K^* t^{1/2} + q \quad (1)$$

$$CNS = K t^{1/2} + q \quad (2)$$

Donde:

$$CNA = \frac{X_{wt}}{X_{s0}}$$

CNA- contenido normalizado de agua

X_{w0} -humedad al tiempo 0 (g/g de muestra)

X_{wt} -humedad al tiempo t (g/g de muestra)

CNS- Contenido normalizado de sólidos

$$CNS = \frac{Z_{st}}{Z_{s0}} \quad (4)$$

Z_{s0} -concentración de soluto en la FL en el momento inicial (g de solutos/g de fracción líquida)

Z_{st} -concentración de solutos en la FL de la fruta en el tiempo t (g/g de fracción líquida)

K - coeficiente global empírico de transferencia de sólidos

K^* - coeficiente global empírico de transferencia de agua

t- tiempo (min)

q- constante

Los valores de K y K^* se calcularon a partir de la pendiente del ajuste lineal de los datos experimentales de la representación de CNS versus $t^{1/2}$ y CNA versus $t^{1/2}$, respectivamente. Convencionalmente se estableció con signo positivo el flujo de masa hacia el interior del producto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta los coeficientes globales de transferencia de agua (K^*), obtenidos del ajuste realizado a los datos experimentales (Eq. 1). Se observa que a 30 y 40 °C, los mayores valores se obtienen a vacíos pulsante y continuo. Estos resultados se atribuyen al desarrollo del mecanismo hidrodinámico (HDM) que favorece el transporte de agua en los poros de la fruta, como ha sido descrito en distintos estudios (3,5-6). A 50 °C se alcanzaron valores más altos y cercanos entre los distintos regímenes, probablemente por la acción predominante de mecanismos difusionales fuertemente potenciados por la temperatura, mientras que el HDM puede quedar inhibido por el ablandamiento de la estructura porosa y el posible colapso de los poros (12).

Tabla 1. Coeficientes globales de transferencia de agua (K^*)

T (°C)	Régimen de presión*	K^* (min ⁻¹)	q	R ²
30	PA	-0,0896	0,9752	0,8767
	VP	-0,1531	1,0034	0,9730
	V	-0,1413	0,9946	0,9729
40	PA	-0,1191	0,9825	0,9395
	VP	-0,1876	1,0066	0,9857
	V	-0,1534	0,9941	0,9642
50	PA	-0,1775	1,0130	0,9775
	VP	-0,1877	0,9934	0,9672
	V	-0,1779	1,0029	0,9768

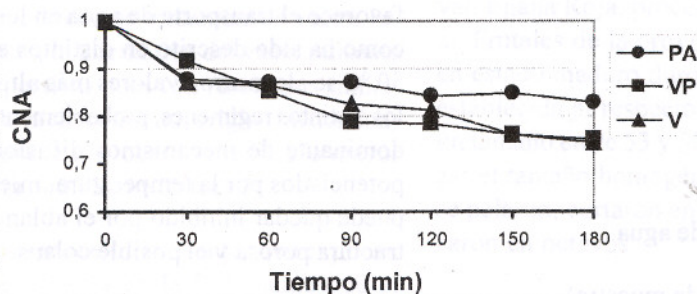
*PA: Presión atmosférica VP: Vacío pulsante V: Vacío continuo

La Fig. 1 (a, b y c) muestra la evolución del CNA en el tiempo de la guayaba deshidratada osmóticamente a presión atmosférica, vacío pulsante y vacío continuo a 30, 40 y 50 °C. En los tres regímenes de presión estudiados se observa que el CNA, como medida del decrecimiento de la humedad final de la fruta respecto a su contenido inicial, tiende a disminuir al aumentar el tiempo y la temperatura, siendo este decrecimiento menor de forma general cuando se trabaja en condiciones atmosféricas.

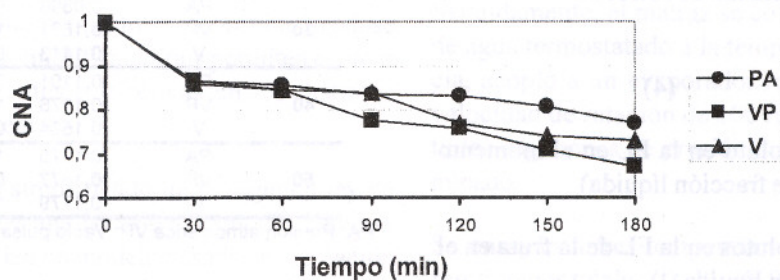
La Fig. 2 (a, b y c) muestra la evolución del contenido normalizado de sólidos (CNS). Se observa que el CNS, como medida del incremento de los sólidos de la fruta respecto al contenido inicial, tiene la tendencia a aumentar con el incremento del tiempo a las tres temperaturas y regímenes de presión estudiados, obteniéndose los mayores valores a vacío pulsante, cuya curva en general se mantiene por encima de los otros dos tratamientos. Este efecto disminuye a 50 °C a las 3 h, lo que

sugiere que la acción del vacío pulsante sobre el CNS de la fruta se reduce a tiempos más largos de tratamiento con el aumento de la temperatura a ese valor. Los mayores CNS aparecen a 40 °C y vacío pulsante.

a) 30 °C



b) 40 °C



c) 50 °C

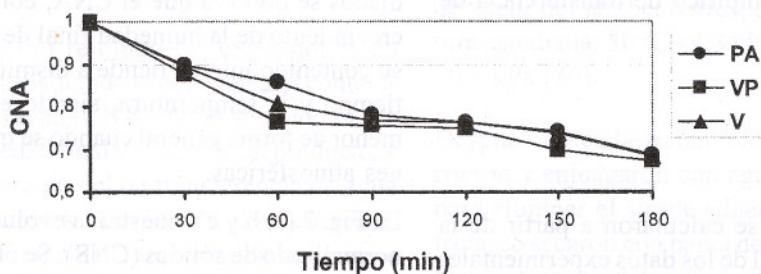


Fig. 1. Evolución del contenido normalizado de agua (CNA) de la guayaba deshidratada osmóticamente a 30, 40 y 50 °C a presión atmosférica (PA), vacío pulsante (VP) y vacío continuo (V).

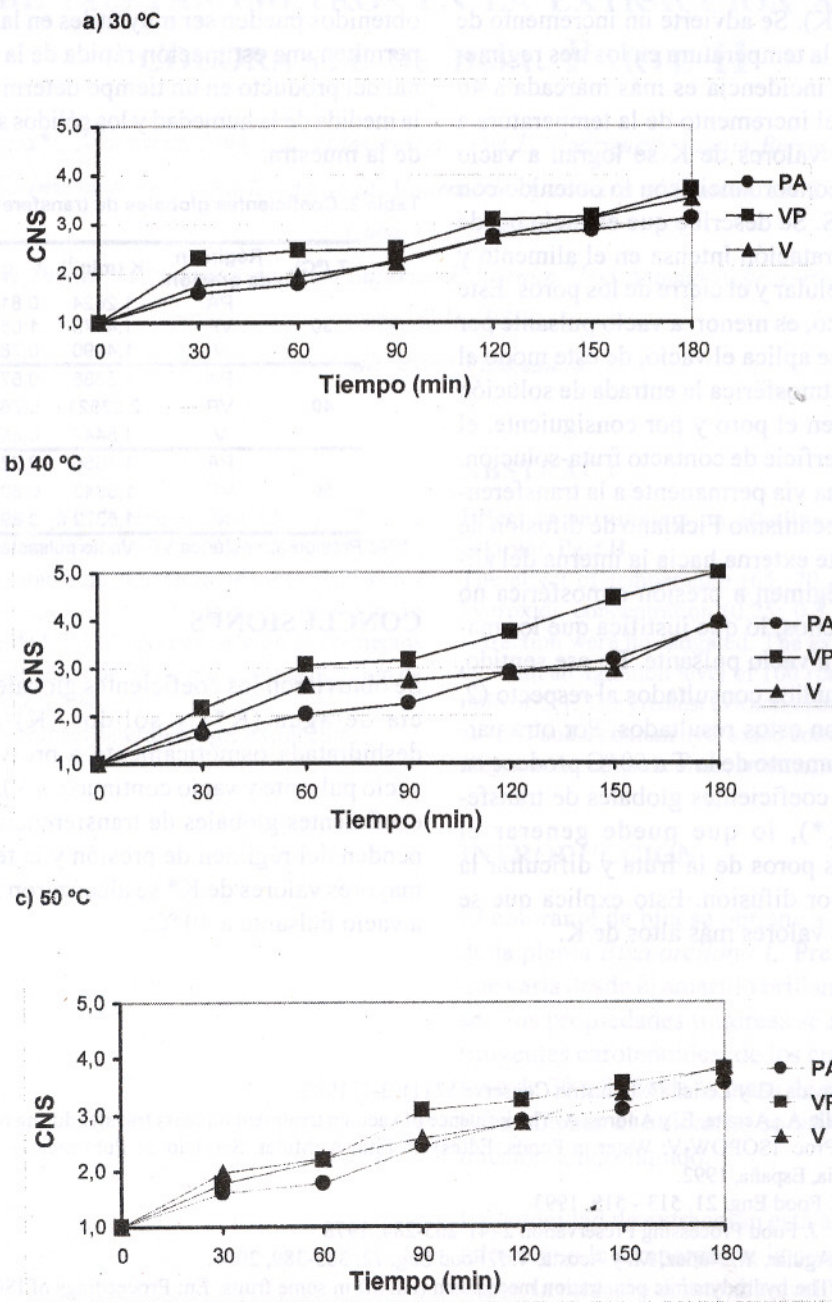


Fig. 2. Evolución del contenido normalizado de sólidos (CNS) de la guayaba deshidratada osmóticamente a 30, 40 y 50 °C a presión atmosférica (PA), vacío pulsante (VP) y vacío continuo (V).

La Tabla 2 muestra los coeficientes globales de transferencia de sólidos (K). Se advierte un incremento de K con el aumento de la temperatura en los tres regímenes de presión. Esta incidencia es más marcada a 40 °C y disminuye con el incremento de la temperatura a 50 °C. Los mayores valores de K se logran a vacío pulsante a 40 °C en concordancia con lo obtenido con la evolución del CNS. Se describe que el vacío puede provocar una deshidratación intensa en el alimento y originar el colapso celular y el cierre de los poros. Este efecto, como es lógico, es menor a vacío pulsante por el corto tiempo que se aplica el vacío, de este modo al restaurar la presión atmosférica la entrada de solución osmótica por HDM en el poro y por consiguiente, el incremento de la superficie de contacto fruta-solución, es grande y ofrece una vía permanente a la transferencia de materia por mecanismo Fickiano de difusión de solutos, desde la parte externa hacia la interna del alimento (13). En el régimen a presión atmosférica no ocurren estos fenómenos, lo que justifica que los mayores K se alcancen a vacío pulsante. En ese sentido, la mayoría de los estudios consultados al respecto (2, 5, 13) concuerdan con estos resultados. Por otra parte, se valoró que el aumento de la T a 50 °C produce en general los mayores coeficientes globales de transferencia de agua (K*), lo que puede generar el colapsamiento de los poros de la fruta y dificultar la entrada de solutos por difusión. Esto explica que se obtengan a 40 °C los valores más altos de K.

Los coeficientes empíricos de transporte de materia obtenidos pueden ser muy útiles en la práctica porque permiten una estimación rápida de la composición final del producto en un tiempo determinado a partir de la medida de la humedad y los sólidos solubles iniciales de la muestra.

Tabla 2. Coeficientes globales de transferencia de sólidos (K)

T (°C)	Régimen de presión	K (min ⁻¹)	q	R ²
30	PA	1,2624	0,8158	0,9526
	VP	1,4179	1,0553	0,9523
	V	1,4090	0,7822	0,9329
40	PA	1,5886	0,6773	0,9014
	VP	2,23521	0,7849	0,9654
	V	1,5447	0,8518	0,9562
50	PA	1,4656	0,7254	0,9267
	VP	1,6943	0,8036	0,9637
	V	1,5372	0,8986	0,9144

*PA: Presión atmosférica VP: Vacío pulsante V: Vacío continuo

CONCLUSIONES

Se obtuvieron los coeficientes globales de transferencia de agua (K*) y sólidos (K) de la guayaba deshidratada osmóticamente a presión atmosférica, vacío pulsante y vacío continuo y a 30, 40 y 50 °C. Los coeficientes globales de transferencia de materia dependen del régimen de presión y la temperatura. Los mayores valores de K* se alcanzaron 50 °C y los de K a vacío pulsante a 40 °C.

REFERENCIAS

- Dalla Rosa, M.; Pinnavaia, G. y Lericci, C. *Industria Conserve* 57 (1): 3-7, 1982.
- Fito, P.; Shi, X.; Chiralt, A.; Acosta, E. y Andres, A. The influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration on some fruits. En: Proc. ISOPOW-V: Water in Foods. Ed(es): P. Fito, A. Mulet. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, España, 1992.
- Fito, P. y Pastor, R. *J. Food Eng.* 21, 513 - 519, 1993.
- Kawkes, J. y Flink, J. J. *Food Processing Preservation* 2 (4): 265-284, 1978.
- Panadés, G.; Fito, P.; Aguiar, Y., Núñez, M. y Acosta, V. J. *Food Eng.* 72: 383-389, 2006.
- Andrés, A. y Fito, P. The hydrodynamic penetration mechanism (HDM) in some fruits. En: Proceedings of ISOPOW-V: Water in Foods. Ed(es): P. Fito y A. Mulet. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, España, 1992.
- Crank, J. *The mathematics of diffusion.* Oxford University Press, Oxford, 1975.
- Panadés, G.; Núñez, M. y Acosta, V. *Alimentaria* (345), 67-70, 2003.
- NC 77-52 *Frutas y vegetales naturales. Guayaba. Especificaciones de calidad.* La Habana: Comité Estatal de Normalización, 1986.
- Hugot, E. *Handbook of Sugar Cane Engineering.* Elsevier Publishing Company. Amsterdam, 1960, p. 349.
- AOAC. *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International. 16th ed. Software Adobe and E-DOC/CJS,* Maryland, 1997.
- Panadés, G.; Castro, D.; Chiralt, A.; Fito, P. y Jiménez, R. J. *Food Eng.* 87(3): 386-390, 2008.
- Fito, P. y Chiralt, A. An update on vacuum osmotic dehydration. In G.V. Barbosa-Cánovas, J. Welti-Chanes (Eds.), *Food preservation by moisture control. Fundamentals and applications.* ISOPOW Practicum II, Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, 1995, pp. 351-374.