

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL AGUA DURANTE EL SECADO DE LÁMINAS DE COROBA

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF WATER DISTRIBUTION COEFFICIENT FOR DRYING FILM COROBA

OTONIEL CORZO¹, NELSON BRACHO², JUSTA RODRÍGUEZ³, ANGEL PEREIRA³, ALBERTO VÁSQUEZ³

¹Departamento de Tecnología de Alimentos, Núcleo de Nueva Esparta, ²Programa de Estadística, Núcleo de Nueva Esparta, ³Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
e-mail: otocorzo@cantv.net

RESUMEN

Se determinó el coeficiente de difusión efectivo del agua (D_e) en láminas de coroba con 1,86 mm de espesor promedio durante el secado con aire. Las láminas se colocaron en el secador formando una capa delgada y se secaron con aire a temperaturas de 71, 82 y 93 °C y velocidades de 0,82; 1,00 y 1,18 m/s. Se midieron los cambios de peso cada 3 min hasta alcanzar un peso constante y se calcularon los contenidos de agua durante el secado. Se ajustaron los datos a la ecuación de Fick para determinar D_e cuyos valores variaron aproximadamente entre $2,68 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y $4,53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. En general, D_e aumentó al incrementar la temperatura y la velocidad del aire. La dependencia con la temperatura siguió la relación de Arrhenius para todas las velocidades del aire. Se encontró que D_e a la velocidad de 1,18 m/s era más sensible a la temperatura ($E_a = 16,64 \text{ kJ/mol}$) mientras que a la velocidad de 1,00 m/s era menos sensible ($E_a = 10,20 \text{ kJ/mol}$). El valor de D_e se correlacionó empíricamente con la temperatura y velocidad del aire.

PALABRAS CLAVE: Coeficiente de difusión, curva de secado, fruto de coroba, Arrhenius

ABSTRACT

The water effective diffusion coefficient (D_e) of coroba slices with an average thickness of 1.86 mm during air drying. Slices were put in drier as a thin layer and the drying was carried out at air temperatures of 71, 82 and 93 °C and air velocities of 0.82, 1.00 and 1.18 m/s. Changes in weight of slices were monitored at 3 min intervals till there was no large variation in the weight, and water contents during drying were calculated. Data was fitted to Fick's in order to determining D_e , which values ranged approximately from $2.68 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ to $4.53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. In general, D_e increased with increasing air temperature and velocity. Dependence on temperature followed an Arrhenius relationship, regardless of air velocity. D_e at 1.18 m/s was found to be the most temperature sensitive ($E_a = 16.64 \text{ kJ/mol}$) while that at 1.00 m/s was the least temperature sensitive ($E_a = 10.20 \text{ kJ/mol}$). D_e value was empirically correlated with air temperature and velocity.

KEY WORDS: Diffusion coefficient, drying curve, fruit of coroba, Arrhenius.

INTRODUCCIÓN

En Venezuela el fruto de la palma de coroba (*Attalea maripa*) se usa como alimento humano debido a su contenido de grasa, fibra, carbohidratos y minerales, posee una masa promedio de 43 g de la cual el 22% corresponde al mesocarpio, que es la fracción comestible. La harina obtenida del mesocarpio seco se utiliza para preparar diversos productos alimenticios tales como arepas, galletas y natillas.

El secado de alimentos húmedos es un proceso complicado que envuelve fenómenos de transferencia de masa y calor simultáneos y acoplados, que ocurren dentro del alimento (Yilbas *et al.* 2003). El transporte del agua en los alimentos, desde su interior hacia la superficie durante el secado, varía ampliamente debido principalmente a las

diferentes estructuras físicas existentes entre ellos.

Las curvas de secado obtenidas de los experimentos de secado bajo condiciones controladas proveen información sobre el mecanismo de transporte de agua y se utilizan para la determinación del coeficiente de difusión efectivo del agua (Saravacos y Maroulis 2001). Existen diferentes metodologías para determinarlo, dependiendo de las geometrías específicas del alimento y condiciones experimentales bien definidas como estables o transientes. Los métodos están basados en la cinética del secado, cinéticas de absorción o desorción y análisis de los perfiles de humedad (Crank 1975, Zogzas y Maroulis 1994, Mwithiga y Olwal 2005).

Para describir el proceso de difusión del agua en los alimentos, la ley de difusión de Fick ha sido utilizada por

muchos investigadores (Azzouz *et al.* 2002; Fasina *et al.* 2002, Kayacier y Singh 2004) y en ella se consideran dos parámetros: la dimensión del alimento y el coeficiente de difusión efectivo. El coeficiente se obtiene encontrando soluciones numéricas o analíticas para los datos (Park *et al.* 2001, Nguyen *et al.* 2006), calculando la relación entre las pendientes de las curvas de difusión teóricas y experimentales (Ade-Omowaye *et al.* 2002, Rastogi y Raghavarao 2004), o aplicando regresión lineal o no lineal (Roberts y Tong 2003, Tungsangprateep y Jindal 2004, Akpinar 2006). Es muy común considerar alguna geometría finita del alimento como una configuración de lámina finita y despreciar la difusión en las otras direcciones.

No se ha encontrado información acerca de la difusión del agua en el fruto de la coroba, por lo cuál los objetivos de este trabajo fueron determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua en láminas de coroba durante el secado con aire caliente y convección forzada y analizar los efectos de la temperatura y la velocidad del aire sobre este coeficiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de las Muestras

Los frutos de la palma de coroba (*Attalea maripa*) se obtuvieron del mismo sembradío en el municipio Cedeño, estado Bolívar, Venezuela. Los frutos empezando a madurar se pelaron, la pulpa se cortó en láminas de espesor promedio igual a 1,86 mm y se determinó el contenido de agua, por cuadruplicado, secando láminas en una estufa al vacío (1,93 Pa) y 60 °C hasta obtener peso constante (AOAC 1990).

Secado

Se utilizó un secador de bandejas fabricado por la compañía Wells Equipment C.O, y que consta de tres unidades básicas, un ventilador que proporciona la velocidad deseada del aire de secado, un intercambiador de calor que utiliza vapor saturado para controlar la temperatura del aire de secado, y la cámara de secado. Una vez establecidas las condiciones de secado, las láminas de coroba (0,454 kg) se esparcieron uniformemente en la bandeja formando una capa delgada de espesor igual a 3 mm, se introdujeron en el secador y se midieron los cambios de peso cada 3 min hasta que se alcanzó un peso constante. El peso de las láminas fue medido en una balanza digital (Denver, modelo PK-1201) con precisión de 0,01 g, colocada fuera del secador y enganchada a la bandeja. El secado se efectuó por triplicado para cada una de las condiciones del proceso

de acuerdo con un diseño factorial 3x3 (dos factores con tres niveles para cada uno) en el cual las temperaturas y velocidades del aire fueron 71, 82 y 93°C, 0,82, 1,00 y 1,18 m/s, respectivamente. La humedad del aire antes de entrar a la cámara de secado fue de $0,018 \pm 0,001$ kg/kg aire seco.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo

Con los cambios de peso de las láminas en el tiempo, obtenidos en cada experiencia se calculó el contenido de agua a los diferentes tiempos de secado, se construyó la curva de secado y a partir de ella se determinó el punto crítico, por el método de los gradientes en puntos específicos, para encontrar la humedad y el tiempo crítico.

Para determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua se consideró que el mecanismo de transferencia de masa era de naturaleza difusional, la resistencia externa a la transferencia de masa era despreciable en comparación con la resistencia interna, el contenido de agua de las láminas era uniforme a través de las láminas, y el coeficiente de difusión era constante y no dependía del contenido de agua en las láminas.

La solución de la segunda ley de la difusión establecida por Fick para la configuración de una lámina finita, corresponde a (Crank 1975):

$$(1) \quad MR = \frac{X_1 - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{r^2} \sum_{n=0}^{n=3} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 r^2 D_e t}{4L^2} \right]$$

siendo MR la relación de los contenidos de agua, X_t , X_e y X_0 los contenidos de agua en las láminas de coroba al cabo de un tiempo de secado t , en el equilibrio y al inicio del secado, D_e el coeficiente de difusión efectivo de agua, L la mitad del espesor de las láminas cuando la transferencia de masa ocurre por los dos lados, y t el tiempo de secado.

Esta solución es válida solamente para la etapa de secado a tasa decreciente en la cual el proceso de secado está controlado por la difusión (Crank 1975), por lo tanto el contenido de humedad inicial para el secado de las láminas de coroba corresponde al valor crítico ($X_0 = X_c$) y el tiempo de secado para cada muestreo corresponde al tiempo medido menos el crítico.

Con los valores de los contenidos de agua se calcularon los valores de MR y se aplicó la regresión no lineal para ajustarlos a la Ec. 1.

Dependencia del Coeficiente de Difusión con la Temperatura

La dependencia del coeficiente de difusión efectivo del agua con la temperatura del aire de secado se representó por la ecuación de Arrhenius:

$$(2) \ln D_e = \ln D_{e0} - \frac{E_a}{RT}$$

siendo el factor de frecuencia (min⁻¹), la energía de activación (kJ/mol), R la constante universal de los gases (8,314 J/mol K) y T la temperatura absoluta (K). El gráfico del logaritmo natural del coeficiente de difusión efectivo vs 1/T resulta en una línea recta con la pendiente negativa igual a $-\frac{E_a}{R}$ y el intercepto igual a $\ln D_{e0}$.

Análisis Estadístico

Para ajustar los datos obtenidos de la relación de contenidos de humedad a la Ec. 1 se utilizó la regresión no lineal de acuerdo al método de Levenberg-Marquandt (Bates y Watts 1988). Para estimar el valor del coeficiente de difusión efectivo del agua (D_e) a cada condición de secado, se tomaron los primeros tres términos de la sumatoria. Para determinar los efectos de la temperatura y la velocidad del aire de secado sobre el coeficiente de difusión efectivo se aplicó un análisis de varianza y la comparación múltiple de medias según LSD con al menos un 95% de confianza. Para ajustar los valores del coeficiente de difusión efectivo del agua a la ecuación de Arrhenius (Ec. 2) se utilizó la regresión lineal simple. Con el fin de generalizar el coeficiente de difusión efectivo como una función de la temperatura y velocidad del aire de secado, se analizaron diversas ecuaciones utilizando la regresión lineal múltiple. Todos los análisis se efectuaron mediante el paquete estadístico Statgraphics 5.0 (Statistical Graphics Corp., Rockville, Md.).

Para evaluar el ajuste de los datos a la solución a la ley de Fick (Ec.1) y comparar los valores de la relación de contenidos de agua predichos por ésta y los experimentales se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el módulo del error relativo medio (ERM), respectivamente. El ERM se calculó por la expresión:

$$(3) ERM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \left(\frac{MR_i - MR_{pi}}{MR_i} \right)^2} \times 100$$

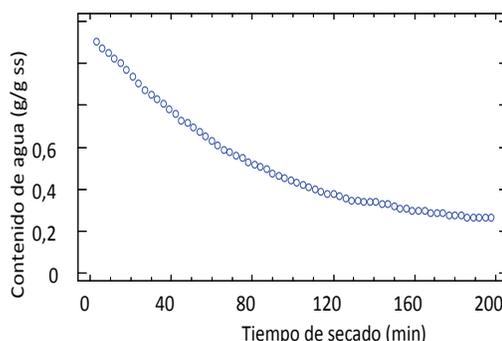
siendo MR_i y MR_{pi} los valores experimentales y predichos respectivamente, y n el número de datos experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

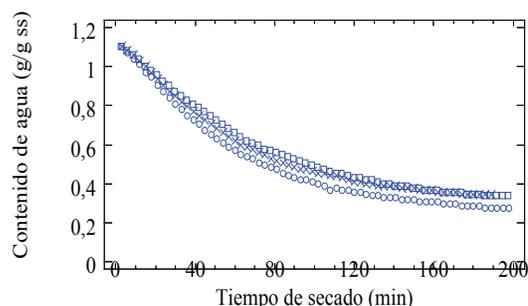
Curvas de Secado

En la Figura 1 se presentan los contenidos de agua en las láminas de coroba durante el tiempo de secado para las temperaturas 71, 82 y 93 °C y las velocidades del aire 0,82, 1,00 y 1,18 m/s. El contenido de agua inicial fue de $1,1044 \pm 0,009$ kg agua/kg sólido seco y el de equilibrio varió entre 0,2311 y 0,3363 kg agua/kg sólido seco. En la Figura 1 se observa que el contenido de agua disminuyó ($p < 0,05$) al incrementar el tiempo de secado, la temperatura y la velocidad del aire. La variación del contenido de agua fue más rápida durante los primeros 60 min de secado y luego se hizo más lenta hasta alcanzar un valor cercano a cero (equilibrio). Para todas las condiciones se encontraron dos etapas de secado: a velocidad constante y a velocidad decreciente; el período de velocidad constante de secado ocurrió en los primeros 10 a 15 min

(71 °C)



(82 °C)



(93 °C)

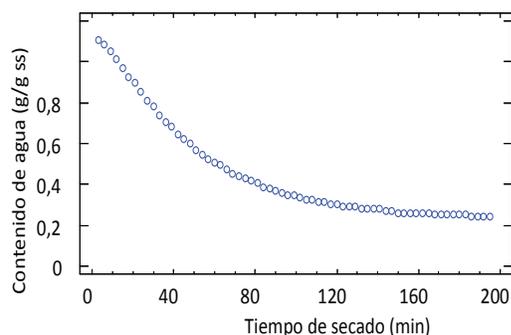


Figura. 1. Variación del contenido de agua en las láminas de coroba durante el secado con aire a diferentes temperaturas y velocidades. (□) 0,82 m/s; (×) 1,00 m/s; (○) 1,18 m/s.

Coefficiente de Difusión Efectivo

Los altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,950$), y la no existencia de un patrón en el gráfico de residuales vs el valor predicho de D_e indican que la segunda ley de la difusión de Fick explica al menos el 95% de los valores experimentales. Los valores de ERM menores de 10% (Tabla 1) indicaron que la ecuación 1 predice (Krokida y Marinos-Kouris 2003) la relación de contenidos de agua durante el secado de las láminas de coroba.

Los valores de D_e variaron entre $2,68 \times 10^{-12}$ m²/s y $4,53 \times 10^{-12}$ m²/s (Tabla 1) y están en el rango normal esperado de 10^{-12} a 10^{-8} m²/s para alimentos deshidratados (Zogzas *et al.* 1996, Giovanelli *et al.* 2002, Gastón *et al.* 2004, Gelly y Santalla 2007), u obtenidos por otros métodos para diferentes alimentos (Veraverbeke *et al.* 2003, Akanbi *et al.* 2006, Nguyen *et al.* 2006). En el secado al sol de semillas de sésamo el valor de D_e fue de $1,89 \times 10^{-8}$ m²/s mientras que en el secado por convección varió entre $7,36 \times 10^{-1}$ m²/s y $1,20 \times 10^{-9}$ m²/s (Al-Mahasneh *et al.* 2007) y en el secado por convección de arroz se encontró un valor de $1,61 \times 10^{-11}$ m²/s (Pereira *et al.* 2010). El valor de D_e durante el secado de un alimento dado depende de los tipos de procedimientos y condiciones experimentales para determinar los contenidos de agua (Zogzas *et al.* 1994), los métodos usados para el tratamiento de los datos obtenidos (Zogzas y Maroulis 1996), y la heterogeneidad de las estructuras (Gelly y Santalla 2007).

El valor del coeficiente de difusión efectivo mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) debidas a la temperatura, velocidad del aire de secado y su interacción. A una temperatura constante, el valor de D_e aumentó al incrementar la velocidad del aire, y a una velocidad constante D_e aumentó al incrementar la temperatura (Tabla 1). Resultados similares fueron obtenidos en el secado de ají rojo (Kaleemullah y Kailappan 2005), tomate (Sacilik *et al.* 2006), semillas de quinoa (Gely y Santalla 2007), ciruela (Goyal *et al.* 2007) y calabaza (Doymaz 2007).

Tabla 1. Coeficiente de difusión efectivo del agua en láminas de coroba a diferentes condiciones de secado.

Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	De x1012 (m ² /s)	R2	ERM (%)
71	0,82	2,68 ± 0,15	0,960	5,01
	1,00	3,19 ± 0,16	0,950	5,62
	1,18	3,20 ± 0,34	0,957	5,79
82	0,82	3,12 ± 0,25	0,947	6,35
	1,00	3,66 ± 0,15	0,954	4,82
	1,18	3,77 ± 0,30	0,967	4,40
93	0,82	3,76 ± 0,19	0,956	4,86
	1,00	3,96 ± 0,16	0,974	4,45
	1,18	4,53 ± 0,23	0,977	3,98

Modelando Efectos de la Temperatura y Velocidad

Dependencia con la temperatura

El ajuste de los datos por regresión lineal a la ecuación de Arrhenius y los parámetros correspondientes se muestran en la Tabla 2. Los valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,75$) indican que la dependencia de D_e con la temperatura del aire de secado está representada por la ecuación de Arrhenius para todas las velocidades del aire. Los parámetros de la ecuación de Arrhenius también se presentan en la Tabla 2. Valores altos de la energía de activación (E_a) indican gran sensibilidad del coeficiente de difusión efectivo a la temperatura, así a una velocidad de 1,18 m/s se tiene la mayor sensibilidad ($E_a = 16,64$ kJ/mol) mientras que a 1,00 m/s se tiene la menor ($E_a = 10,20$ kJ/mol). Robert y Tong (2003) señalaron que un proceso controlado por la difusión tiene una energía de activación menor de 34 kJ/mol, por lo tanto los valores estimados de E_a sugieren que la difusión del agua en las láminas de coroba es el mecanismo limitante del secado con aire.

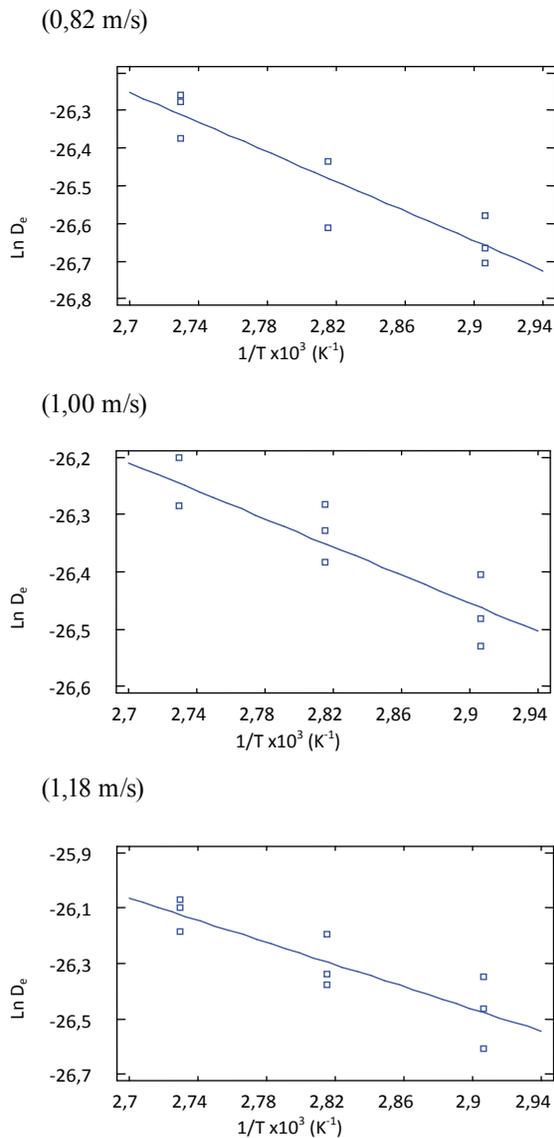


Figura. 2. Influencia de la temperatura del aire sobre el coeficiente de difusión efectivo del agua a diferentes velocidades del aire.

El ajuste de los datos por regresión lineal a la ecuación de Arrhenius y los parámetros correspondientes se muestran en la Tabla 2. Los valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,75$) indican que la dependencia de D_e con la temperatura del aire de secado está representada por la ecuación de Arrhenius para todas las velocidades del aire. Los parámetros de la ecuación de Arrhenius también se presentan en la Tabla 2. Valores altos de la energía de activación (E_a) indican gran sensibilidad del coeficiente de difusión efectivo a la temperatura, así a una velocidad de 1,18 m/s se tiene la mayor sensibilidad ($E_a = 16,64$ kJ/mol) mientras que a 1,00 m/s se tiene la menor ($E_a = 10,20$

kJ/mol). Robert y Tong (2003) señalaron que un proceso controlado por la difusión tiene una energía de activación menor de 34 kJ/mol, por lo tanto los valores estimados de E_a sugieren que la difusión del agua en las láminas de coroba es el mecanismo limitante del secado con aire

Tabla 2. Ajuste de los valores del coeficiente de difusión efectivo del agua a la ecuación de Arrhenius, para diferentes velocidades del aire de secado, y los parámetros respectivos de energía de activación (E_a) y factor de frecuencia ($\ln(D_{e0})$).

Parámetro	Velocidad del aire (m/s)		
	0,82	1,00	1,18
$\ln(D_{e0})$	-20,93±0,95*	-22,90±0,68*	-20,66±1,20*
E_a (kJ/mol)	16,38±2,82*	10,20±2,26*	16,64±3,55*
R^2	0,828	0,787	0,758

* significativo a $\alpha = 0,001$

Dependencia con la temperatura y velocidad del aire

El modelo ajustado para el coeficiente de difusión efectivo del agua como una función lineal de la temperatura (T) y velocidad (V) del aire secado corresponde a (Tabla 3):

$$(4) \quad h D_e = -28,73 + 0,40 (T) + 0,14 (V)$$

El modelo explica el 79,6 % de la variabilidad en con la temperatura y la velocidad del aire (Tabla 3). En la ecuación 4 los coeficientes para la temperatura y la velocidad son positivos, esto indica que aumenta al incrementar la temperatura y la velocidad tal como fue discutido en la sección anterior. Con este modelo se calcula el coeficiente de difusión efectivo del agua en láminas de coroba secadas con aire a temperaturas de 71, 82 y 93 °C y velocidades de 0,82, 1,00 y 1,18 m/s.

Tabla 3. Ajuste del coeficiente de difusión efectivo del agua como una función de la temperatura (T) y velocidad (V) del aire de secado.

Parámetro	Estimado	Error estándar	Estadístico t	Valor p
Constant	-28,73	0,71	-164,21	< 0,0001
V	0,14	0,17	8,09	< 0,0001
T	0,40	0,10	5,31	< 0,0001
R^2	0,796			

CONCLUSIONES

En este estudio se utilizó la solución de la ley de Fick para determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua durante el secado de láminas de coroba a diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire de secado. Los valores encontrados fueron comparables con los

publicados para otros alimentos deshidratados y dependen de la temperatura y la velocidad del aire de secado. La dependencia con la temperatura está representada por la ecuación de Arrhenius. Se encontró un modelo para calcular el coeficiente de difusión en función de la temperatura y la velocidad del aire de secado. Hasta el momento la obtención de harina de coroba es totalmente artesanal, por lo cual los resultados de este estudio de secado con aire en un secador de bandejas, representa un primer avance en la industrialización de la harina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADE-OMOWAYE B.I.O., RASTOGI N.K., ANGERSBACH, A., KNORR, D. 2002. Osmotic dehydration behavior of red paprika (*Capsicum annuum* L.). *J. Food Sci.* 67(5): 1790-1796.
- AKANBI C.T., ADEYEMI R.S., OJO A. 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *J. Food Eng.* 73: 157-163.
- AKPINAR E.K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J. Food Eng.* 7: 75-84.
- AL-MAHASNEH M., RABABAH T.M., AL-SHBOOL M.A., YANG W. 2007. Thin-layer drying kinetics of sesame hulls under forced convection and open sun drying. *J. Food Proc. Eng.* 30: 324-337.
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C. pp. 1285-1286.
- AZZOUZ S., GIZANI A., JONAA W., BELGHITH A. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *J. Food Eng.* 55(4): 323-330.
- BATES D.M., WATTS D.G. 1988. Nonlinear regression and its applications. Wiley, New York. pp.143-175.
- CRANK J. 1975. The mathematics of diffusion. (2nd ed.). Clarendon Press, Oxford. pp 324-325.
- DOYMAZ I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J. Food Eng.* 79(1): 243-248.
- FASINA O., FLEMING H., THOMPSON R. 2002. Mass transfer and solute diffusion in brined cucumbers. *J. Food Sci.* 67 (1): 181-187.
- GASTÓN A.L., ABALONE R.M., GINER S.A., BRUCE D.M. 2004. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Eng.* 8(2): 175-185.
- GELY M.C., SANTALLA E., M. 2007. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *J. Food Eng.* 78(3): 1029-1033.
- GIOVANELLI G., ZANONI V., LAVELLI V., NANI R. 2002. Water sorption, drying and antioxidant properties of tomato products. *J. Food Eng.* 52: 135-141.
- GOYAL R.K., KINGSLEY A.R.P., MANIKATAN M.R., ILYAS S.M. 2007. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *J. Food Eng.* 79(1): 176-180.
- KALEEMULLAH S., KAILAPPAN R. 2005. Drying kinetics of red chillies in rotary dryer. *Biosystems Eng.* 92: 15-23.
- KAYACIER A., SINGH R.K. 2004. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. *Lebensm. Wiss. u Technol.* 37(2): 275-281.
- KROKIDA M.K., MARINOS-KOURIS D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *J. Food Eng.* 57: 1-7.
- MWITHIGA G., OLWAL J.O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *J. Food Eng.* 71: 373-378.
- NGUYEN T.A., VERBOVEN P., SCHEERLINCK N., VANDEWALLE S., NICOLAI B.M. 2006. Estimation of effective diffusivity of pear tissue and cuticle by means of a numerical water diffusion model. *J. Food Eng.* 72: 63-72.
- PARK K.J., YADO M.K.M., BROD F.P.R. 2001. Drying studies of sliced pear bartlett (*Pyrus* sp.). *Ci. Tecnol. Aliment.* 21(3): 288-292.
- PEREIRA W., PRECKER J.W., SILVA C., PALMEIRA J. 2010. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method:

- Application to the drying of rough rice. *J. Food Eng.* 98: 302–308.
- RASTOGI N.K., RAGHAVARAO K.S.M.S. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm. Wiss. Technol.* 37(1): 43-47.
- ROBERTS J.S., TONG C.H. 2003. The development of an isothermal drying apparatus and the evaluation of the diffusion model on hygroscopic porous material. *Int. J. Food Prop.* 6(1): 165–180.
- SACILIK K., KESKIN R., ELICIN A.K. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J. Food Eng.* 73: 231-238.
- SARAVACOS G.D., MARCOULIS A.B. 2001. Transport properties of foods. Marcel Dekker, Inc., New York. pp. 65-80.
- TUNGSANGPATEEP S., JINDAL V.K. 2004. Sorption isotherms and moisture diffusivity in fried cassava-shrimp chips. *Int. J. Food Prop.* 7(2): 215-227.
- VERAVERBEKE E., VERBOVEN P., SCHEERLINCK N., HOANG M.L., NICOLAI B.M. 2003. Determination of the diffusion coefficient of tissue, cuticle, cutin and wax of apple. *J. Food Eng.* 58: 285–294.
- YILBAS B.S., HUSSAION M.M., DINCER I. 2003. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. *Heat Mass Transfer.* 39: 471-476.
- ZOGZAS N.P., MAROULIS Z.B. 1996. Effective moisture diffusivity estimation from drying data- A comparison between various methods of analysis. *Drying Technol.* 14(7-8): 1543-1573.
- ZOGZAS N.P., MAROULIS Z.B., MARINOS-KOURIS D. 1994. Moisture diffusivity methods of experimental determination: A review. *Drying Technol.* 12(3): 483-515.
- ZOGZAS, N.P., MAROULIS, Z.B., MARINOS-KOURIS, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technol.* 14(10): 2225–2253.