

Secado de Cajuil (*anacardium occidentale L.*): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado

Jacek S. Michalewicz*, Jorge R. Henriquez y José C. Charamba

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM, Cidade Universitária s/n, Recife-Pernambuco-Brasil.
(e-mail: jacek.ifpe@gmail.com)

*autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Ene.20, 2011; Aceptado Feb. 21, 2011; Versión Final recibida Abr. 19, 2011

Resumen

Se determina experimentalmente la cinética de secado de muestras de cajuil (*anacardium occidentale L.*) en rebanadas de 4, 7 y 10 x 10⁻³ m de espesor. Se utilizó un secador de laboratorio tipo bandeja, en donde se imponen las temperaturas y velocidades del aire para el secado dentro de los rangos 60 a 80 °C y 3 a 5 m/s, respectivamente. Se determina el perfil de contenido de humedad en la muestra respecto al tiempo de secado. Se aplican once modelos matemáticos disponible en la literatura para determinar el que correlacione los datos experimentales. De los resultados y de su análisis se establece que el modelo de Page es el más adecuado por la simplicidad con que relaciona el contenido de humedad con las variables temperatura y velocidad del aire de secado.

Palabras clave: secado, cajuil, anacardium occidentale L., modelos de secado, humedad

Drying of Cashew (*anacardium occidentale L.*): Experimental Study and Drying Kinetics Modeling

Abstract

The drying kinetics of sliced cashew (*anacardium occidentale L.*) has been experimentally studied. Samples of 4, 7 and 10 x 10⁻³ m thick were used. A laboratory tray type dryer was employed and air at temperatures in the range 60 to 80 ° C and velocity from 3 to 5 m/s were imposed. The moisture content profile in the sample with respect to drying time was measured. Eleven mathematical models available in the literature were applied to determine which of the model is the best one in correlating the experimental data. The results indicate that the model of Page is the most adequate due to its simplicity for relating the moisture content and the variables temperature and drying air velocity.

Keywords: drying, cashew, anacardium occidentale L., drying models, moisture

INTRODUCCIÓN

El secado de alimentos es sin duda una de las operaciones más antiguas y comunes de los procesos industriales. El propósito del secado es la obtención de un producto con una vida útil más larga, lo que posibilita la reducción de los gastos por pérdidas y el aumento de la calidad del producto final, resultando en el fortalecimiento de la competitividad y rentabilidad de la agroindustria local y nacional en los mercados interno y externo. En este trabajo, se estudia el proceso de secado de rebanadas de Cajuil (*Anacardium occidentale* L.). El Cajuil es un fruto original del Noreste brasileño que fue descubierto por los nativos de estas tierras, quienes lo consumían como fruta *in natura*, como jugo extraído por prensado manual o como una bebida fermentada en conmemoraciones y en ocasiones especiales. Esta fruta es compuesta por una semilla, llamada castaña, y de un tallo.

Según IBGE (2011), la agroindustria de Cajuil del Noreste brasileño tiene relevante importancia socio-económica para el país, en función de la explotación de 769.465 ha de tierras cultivadas que movilizan cerca de 300 mil campesinos. Además del fruto, anualmente se producen 295.668 Ton. de castaña, que pueden ser consumida como alimento y, 2 millones de toneladas de pedúnculo por año, proporcionando valor agregado al cultivo de Cajuil. Sin embargo, el Cajuil se caracteriza por ser un producto frágil, altamente desechable, que presenta mecanismos aceleradores de degradación microbiológica, lo que contribuye al rechazo o pérdida de centenas de millares de toneladas del producto, alcanzando cerca del 80% de la producción.

El estudio del proceso de secado de un producto requiere del análisis de los fenómenos de transferencia de calor y masa que tienen lugar simultáneamente. En este proceso, el calor es transferido por convección del aire caliente para el producto, aumentando su temperatura, y la temperatura del agua contenida en la forma de humedad. La transferencia de masa ocurre cuando la humedad presente emigra en la forma de líquido o vapor del interior del producto hacia la superficie y entonces, es transferida para el aire en la forma de vapor de agua. Según Strumillo y Kudra (1989), el proceso es fuertemente influenciado por la temperatura y la velocidad de la corriente del aire que circula alrededor del producto. Para la cuantificación de la influencia de los efectos antes mencionados se puede recurrir a procedimientos experimentales o a la simulación computacional. En la literatura técnica hay disponible numerosos modelos matemáticos, para el secado de rebanadas finas de diversos productos agrícolas, por ejemplo, manzanas (Menges y Ertekin, 2006), higos (Xanthopoulos et. al, 2007), pimentón (Akpınar y Bicer, 2008), papas y calabazas (Akpınar, 2006), los cuales pueden ser evaluados para determinar su aplicabilidad en la predicción del secado de Cajuil.

En este trabajo se emplearon técnicas experimentales para la determinación del tiempo de secado, difusividad efectiva y energía de activación de muestras de Cajuil. Luego, se cuantificó las diferencias entre las predicciones arrojadas por cada modelo matemático considerado y los datos experimentales mediante la estimación del coeficiente de determinación en una regresión por mínimos cuadrados, del chi-cuadrado (χ^2) y de la raíz cuadrada del error medio (RMSE). Finalmente, se elige el modelo computacional que presenta el mejor ajuste a los datos experimentales para la predicción del secado del Cajuil. Fue utilizado herramientas computacionales, tales como Matlab y Statistica 5.0, para llevar a cabo las regresiones para cada modelo.

MATERIALES Y METODOS

En este estudio, se utilizaron cajuales producidos en la región Noreste del Brasil, los cuales fueron cortados en rebanadas de varios espesores y secados en un secador tipo bandeja, que fue construido e instalado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Pernambuco en Recife-Pernambuco-Brasil. En la construcción del secador, se utilizó recomendaciones de la norma ISO5801 (1997) para definir el dimensionamiento del ventilador y el laminador de aire y, las distancias mínimas para el posicionamiento del área de los ensayos y de la instrumentación. El secador consiste de cuatro módulos básicos, mostrados en la Figura 1. El Primer módulo es el de flujo y contiene un ventilador con control de velocidad a través de un

dámper instalado en su entrada. El segundo módulo es el de calentamiento compuesto por un conjunto de tres resistencias eléctricas de 1000 W cada una, responsable por el calentamiento del aire de secado proveniente del primer módulo. El tercer módulo es el de equalización del aire de secado, compuesto por ductos y un laminador de aire. Finalmente, el cuarto módulo que es la sección de ensayos compuesta por un medidor de temperatura y humedad del aire de secado, una ventana de inspección, una bandeja donde son colocadas las muestras y, una salida que contiene un medidor de velocidad del aire.

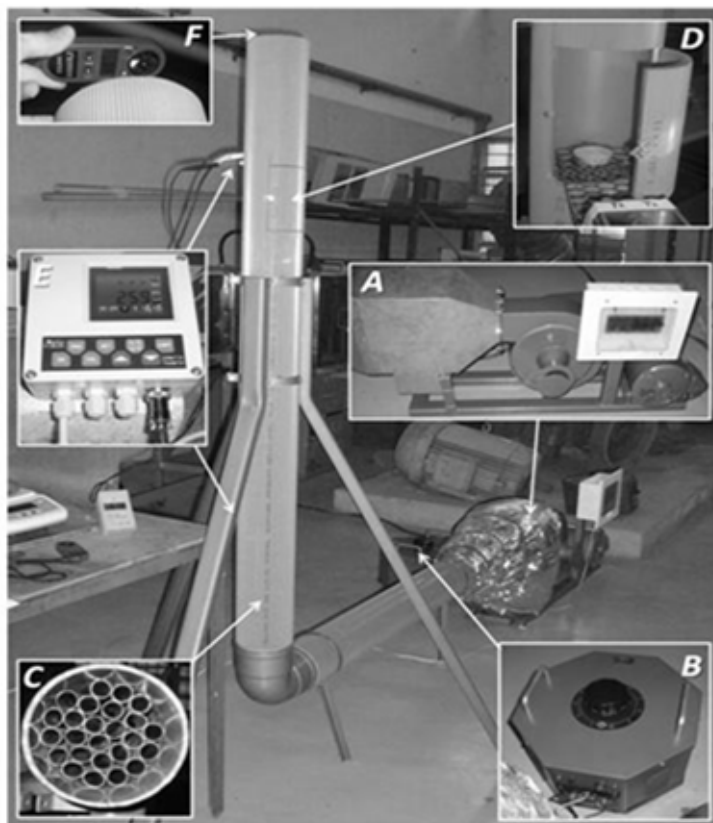


Fig. 1: Detalles del secador de bandeja: a) Ventilador y calefacción del aire; b) Controle de la temperatura; c) Laminador del aire; d) área de ensayo; e) Termo-higrómetro; e f) anemómetro.

En el secador fue instalado tres termo-higrómetros, dos internamente para obtener datos de temperatura y humedad del aire antes y después de las muestras, y uno externo al secador para la medición de la temperatura y la humedad del aire del ambiente. Las mediciones de las velocidades del aire fueron obtenidas a través de mediciones realizadas en el bocal de salida del secador, utilizándose un anemómetro de hélices, la medición de la pérdida de masa de las muestras fueron obtenidas a través de lecturas constantes de una balanza semi-analítica con precisión de $0,01 \times 10^{-3}$ kg.

Los cajules fueron adquiridos en el mercado local, previamente seleccionados de acuerdo con su grado de maduración, coloración de la piel y ausencia de daños físicos. Los cajules fueron lavados en agua destilada y sin retirar la cáscara, fueron cortados en rodajas, de $4, 7$ y 10×10^{-3} m de espesor, utilizando un cortador en acero inoxidable con láminas ajustables. Se realizaron 27 experimentos, variando las temperaturas del aire de secado en $60, 70$ y 80 °C y las velocidades del aire en $3, 4$ y 5 m/s. La determinación final del material durante el secado fue realizada por pérdida de la masa, pesando el material a cada 1200 segundos en una balanza localizada del lado externo al secador. Este procedimiento fue repetido hasta que el material alcanzara un peso constante, indicando de esta forma que había alcanzado la humedad de equilibrio. A partir de estos datos, fue calculado la cantidad de humedad (XR), que es la razón directa entre la masa de agua presente en el material y la masa de la materia seca, cuyo valor para el cajuil es de 88% (Taco, 2006). Por fin, estos valores fueron adimensionalizados a través de la ecuación (1).

$$XR = \frac{(X - X_e)}{(X_o - X_e)} \quad (1)$$

Donde, X es la humedad para cada instante de tiempo, X_e es la humedad de equilibrio, y el X_o es la humedad inicial.

Los 11 modelos presentados en la Tabla 1, fueron individualmente ajustados a los datos experimentales del contenido de humedad adimensional obtenida a través de la Ecuación (1). Un procedimiento semejante fue llevado a cabo por, Mohammadi et al. (2009), al secar kiwi; Menges y Ertekin (2006), al secar manzanas; Lee y Kim (2009), al secar rabano; Xanthopoulos et al. (2007), al secar higos; Alpıcar y Bicer (2008), al secar pimentones; y Akpınar (2006), quien seco papas y calabazas.

Tabla 1: Modelos matemáticos aplicados para la predicción de curvas de secado.

Nombre del Modelo	Expresión	Referencias	Ec.
Page	$XR = \exp(-kt^n)$	Park et al. (2002)	(2)
Newton	$XR = \exp(-kt)$	Ayensu. (1997)	(3)
Henderson & Pabis	$XR = a \exp(-kt)$	Henderson y Pabis (1961)	(4)
Logarítmico	$XR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz y Ertekin (2001)	(5)
Wang & Singh	$XR = 1 + at + bt^2$	Wang y Singh (1978)	(6)
Midilli et al.	$XR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)	(7)
Two-term	$XR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$	Yaldiz et al.(2001)	(8)
Werma et al.	$XR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	Yaldiz y Ertekin (2001)	(9)
Simp. Fick's diffus. eq.	$XR = a \exp(-c(t/L^2)^n)$	Diamante y Munro (1991)	(10)
Modified page eq. II	$XR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Diamante y Munro (1991)	(11)
Modif. Henderson & Pabis	$XR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Togrul y Pehlivan (2003)	(12)

Para la evaluación cuantitativa de la relación entre los datos obtenidos de las curvas ajustadas y los datos experimentales, es necesario el uso de parámetros como estadísticos el coeficiente de determinación, el chi-cuadrado y el error medio cuadrático (RMSE).

El Coeficiente de determinación (r^2), el cual indica que tan exactos son los valores simulados de los reales en función de la línea recta, esto es, la proximidad de todos los valores tener el mismo valor para cada condición en el tiempo, temperatura y velocidad del aire. A pesar de esto, ni siempre puede se afirmar que para valores de (r^2) próximos de la unidad, representan un buen ajuste, ya que es posible obtener valores elevados de (r^2) cuando la relación entre los datos reales y simulados no representa un comportamiento lineal.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{pred,i} - XR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{XR}_{pred} - XR_{pred,i})^2} \quad (13)$$

Donde, XR_{pred} es el contenido de la humedad adimensional previsto, e XR_{exp} es el contenido de humedad adimensional del experimento.

El chi-cuadrado reducido (χ^2), es otro parámetro que compara las variaciones entre resultados experimentales y previstos. Este parámetro permite determinar realmente se es posible representar un conjunto de valores como distribución normal, y verificar se este conjunto se encuentra dentro de los valores de probabilidad que permiten definir el mismo.

$$\chi^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{exp,i} - XR_{pred,i})^2}{N - n} \quad (14)$$

Donde N es el número de observaciones y n es el número de coeficientes.

El error cuadrado medio (RMSE), es la variabilidad media de la distancia entre el valor previsto y el observado. Este índice nos da idea de la diferencia existente entre la matriz de variancia y la de covariancia de la muestra y la matriz del modelo obtenido, partiendo del presupuesto que el modelo es adecuado. Los valores superiores a 0,10 evidencian un ajuste débil, cuando oscilan entre 0,08 y 0,10 reflejan un ajuste mediocre, entre 0,08 y 0,06 un ajuste razonable y cuando son inferiores a 0,06 indican un buen ajuste, Browne e Cudeck, (1993). Cuando el modelo es perfecto el RMSE es igual a cero, en este sentido, cuanto más próximo de 0 (cero) sea el valor, mayor es la proximidad entre la matriz de variancias y covariancias estimada y la matriz de los datos.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (XR_{pred,i} - XR_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (15)$$

Fueron realizadas regresiones no lineares para obtener los coeficientes de los modelos en las diferentes condiciones de operación y regresiones lineares para el ajuste total de los resultados, o sea, la generación de modelos en función de las condiciones de temperatura y velocidad de operación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos del contenido de humedad de cada modelo fueron separados según el espesor inicial de las rodajas (4, 7 y 10 x 10⁻³ m), para las diversas combinaciones de las temperaturas y velocidades señaladas anteriormente. Los 11 modelos fueron comparados sobre la base de sus resultados estadísticos, es decir, r^2 , RMSE y χ^2 , y los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados estadísticos de los modelos matemáticos aplicados en las curvas medias de secado.

Ec.	4 mm			7 mm			10 mm		
	r2	RMSE	χ^2	r2	RMSE	χ^2	r2	RMSE	χ^2
(2)	9.973E-1	1.652E-2	2.802E-4	9.815E-1	3.916E-2	1.551E-3	9.945E-1	2.017E-2	4.123E-4
(3)	9.970E-1	1.715E-2	2.989E-4	9.959E-1	1.823E-2	3.518E-4	9.953E-1	1.851E-2	3.808E-4
(4)	9.971E-1	1.710E-2	3.007E-4	9.960E-1	1.803E-2	3.429E-4	9.955E-1	1.807E-2	3.679E-4
(5)	9.972E-1	1.676E-2	2.857E-4	9.958E-1	1.871E-2	3.529E-4	9.960E-1	1.724E-2	2.996E-4
(6)	5.600E-1	2.781E-1	8.350E-2	8.509E-1	1.275E-1	1.934E-2	9.399E-1	7.892E-2	8.230E-3
(7)	9.970E-1	1.744E-2	3.172E-4	9.799E-1	4.070E-2	1.703E-3	9.942E-1	2.051E-2	4.476E-4
(8)	9.969E-1	1.754E-2	3.262E-4	9.960E-1	1.805E-2	3.490E-4	9.955E-1	1.808E-2	3.696E-4
(9)	9.970E-1	1.713E-2	3.063E-4	9.966E-1	1.655E-2	3.085E-4	9.958E-1	1.740E-2	3.619E-4
(10)	9.971E-1	1.710E-2	3.007E-4	9.960E-1	1.803E-2	3.429E-4	9.955E-1	1.807E-2	3.679E-4
(11)	9.975E-1	1.577E-2	2.573E-4	9.945E-1	2.101E-2	4.801E-4	9.958E-1	1.743E-2	3.586E-4
(12)	9.972E-1	1.669E-2	2.976E-4	9.008E-1	9.108E-2	9.539E-3	9.950E-1	1.892E-2	4.073E-4

Se puede observar que el modelo que presento el peor resultado fue el de Wang & Singh, cuyos valores del coeficiente de determinación (r^2) fueron de 5,60x10⁻¹, 8,51x10⁻¹, 9,40x10⁻¹ para los espesores de 4, 7 e 10 x 10⁻³ m, respectivamente. Además, Browne e Cudeck, (1993), afirman que cuando los valores de RMSE son superiores a 0,10 evidencian un ajuste débil, por lo tanto

podemos concluir que este modelo no representa bien el secado de cajuil en rebanadas para las condiciones experimentales empleadas en este trabajo.

De los resultados obtenidos, se puede observar que los valores del coeficiente de determinación (r^2) y el (χ^2) están bien próximos entre los demás modelos, y los valores del RMSE están por debajo de 0,06 que conforme Browne e Cudeck, (1993), indica un buen ajuste de estos modelos. El criterio utilizado para evaluar el mejor modelo, fue la busca de aquel que tuviese el menor RMSE y χ^2 , de esta forma los modelos Modified Page equation II, Werma et al., y Logarítmico, se mostraron ligeramente mejores en relación a los demás, para los espesores iniciales de 4, 7 y 10 x 10⁻³ m, respectivamente. Por tanto, se puede concluir que todos los modelos presentados, con excepción del modelo de Wang & Singh, representan bien el proceso de secado de cajuil en rebanadas.

Para cuantificar el efecto de las variables de secado sobre los coeficientes de los modelos de Modified Page equation II, Werma et al., y Logarítmico, conforme las ecuaciones 11, 9 y 5 de la Tabla 1 respectivamente, estos coeficientes fueron correlacionados con la temperatura y la velocidad del aire de secado para cada condición de ensayo, en los espesores especificados de las muestras, a través de la análisis de regresión múltiple. Basado en estos, las correlaciones y los coeficientes fueron los siguientes, conforme la Tabla 3.

Tabla 3: Correlaciones de los coeficientes de los modelos con la temperatura y la velocidad.

	4 mm	7 mm	10 mm
Modelo Modified Page Equation II			
k	-0.1424 + 0.0019*T + 0.0188*V	-0.2109 + 0.0032*T + 0.0217*V	-0.1649 + 0.0034*T + 0.0136*V
n	0.9242 + 0.0020*T - 0.0178*V	1.1349 - 0.0010*T - 0.0167*V	0.9990 + 0.0008*T - 0.0151*V
Modelo Werma et al.			
a	0.1123 - 0.0030*T + 0.0266*V	-0.1581 + 0.0004*T + 0.0322*V	0.1499 - 0.0026*T + 0.0105*V
k	-0.4110 + 0.0059*T + 0.1750*V	0.4285 - 0.0014*T + 0.0039*V	3.6975 - 0.0111*T - 0.4174*V
g	-0.1032 + 0.0016*T + 0.0076*V	-0.0239 + 0.0005*T + 0.0022*V	-0.0163 + 0.0003*T + 0.0006*V
Modelo Logarithmic			
a	1.0062 + 0.0002*T - 0.0041*V	1.0962 - 0.0008*T - 0.0056*V	1.0372 + 0.0007*T - 0.0165*V
k	-0.0962 + 0.0014*T + 0.0087*V	-0.0322 + 0.0005*T + 0.0031*V	-0.0146 + 0.0003*T + 0.0006*V
c	-0.0020 - 0.0001*T + 0.0025*V	-0.0556 + 0.0005*T + 0.0021*V	-0.0321 + 0.0001*T + 0.0027*V

Substituyendo los valores de las temperaturas y velocidades del aire en las ecuaciones de la tabla 3, se obtuvieron los valores de los coeficientes de cada modelo, que fueron substituidos en las propias ecuaciones, resultando al final los valores de XR para cada tiempo. Los valores de XR de los modelos fueron comparados a los del experimento y graficados conforme las Figuras 2 a la 9 resaltando los modelos que presentaron mejor ajuste para cada espesor utilizado.

La Figura 2 muestra la comparación de los tres modelos seleccionados, considerando la temperatura de secado de 80 °C, velocidad de 4 m/s, y espesor de 7 x 10⁻³ m. Se puede ver que los modelos de Werma y Logarítmico presentan una buena concordancia con los datos experimentales, mientras que el modelo Modified Page equation II diverge totalmente a pesar haber presentado parámetros estadísticos adecuados como se mostró en la Tabla 3. La razón de esto, reside en el hecho de que el modelo Modified Page equation II considera explícitamente en su ecuación el espesor de la muestra. Como este material encoge durante el proceso de secado, fue necesaria la utilización de valores medios del espesor durante el estudio estadístico. En la construcción de la Figura 2 se considera el valor fijo del espesor, observándose una diferencia significativa entre los modelos. Está claro que el modelo no es apropiado cuando la muestra sufre encogimiento y por este motivo se resolvió desconsiderar el modelo Modified Page equation II en el presente estudio. Este mismo comportamiento fue observado para los otros espesores.

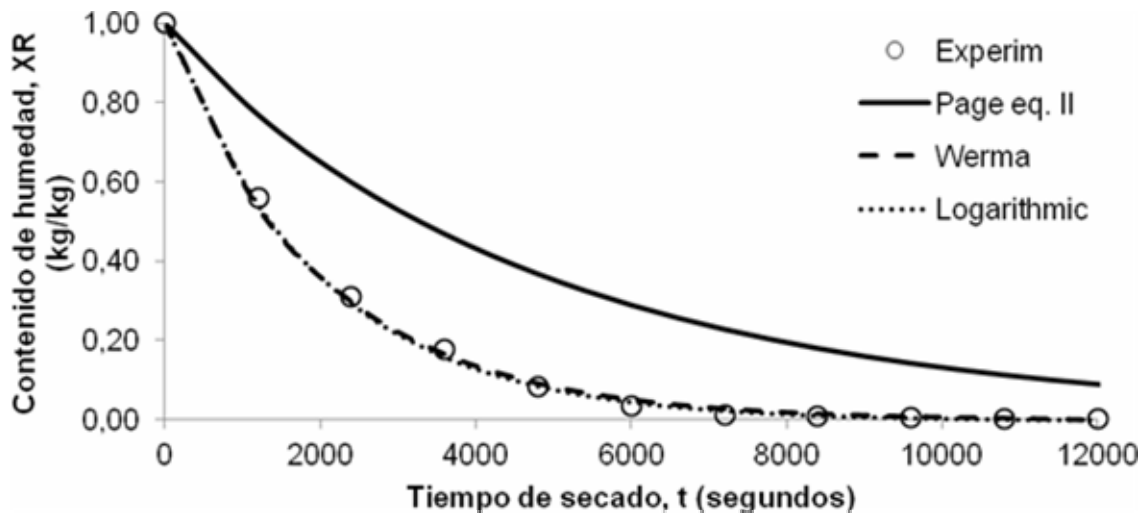


Fig. 2: Comparación de los resultados de XR, experimentales y previstos, 7×10^{-3} m de espesura.

Las Figuras 3 hasta la 5, presentan una comparación de la variación de humedad (XR) frente al tiempo de secado utilizando los resultados experimentales y los resultados obtenidos con el modelo Werma et al., para el secado de rebanadas de cajuil con espesura de 7×10^{-3} m y velocidades de 3, 4 y 5 m/s, respectivamente.

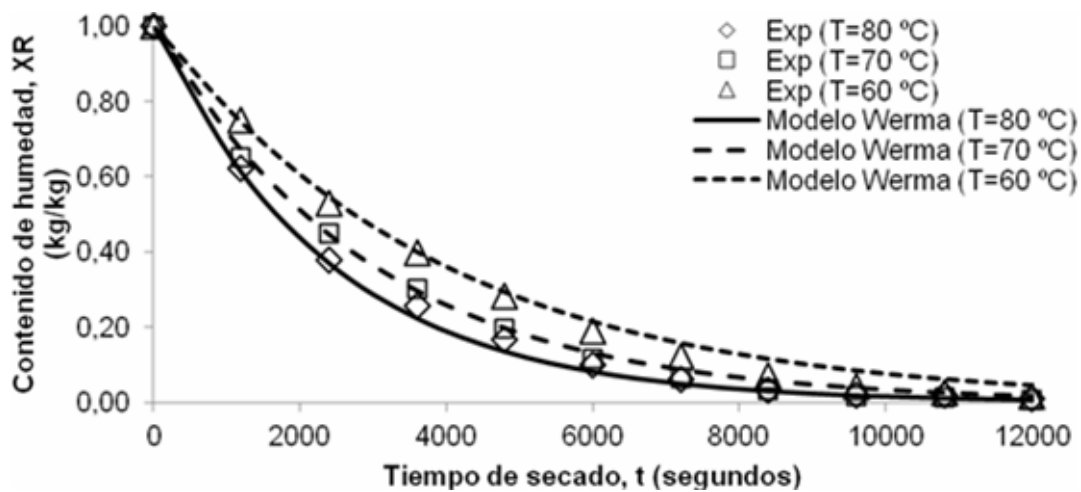


Fig. 3: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 3 m/s y espesura de 7×10^{-3} m.

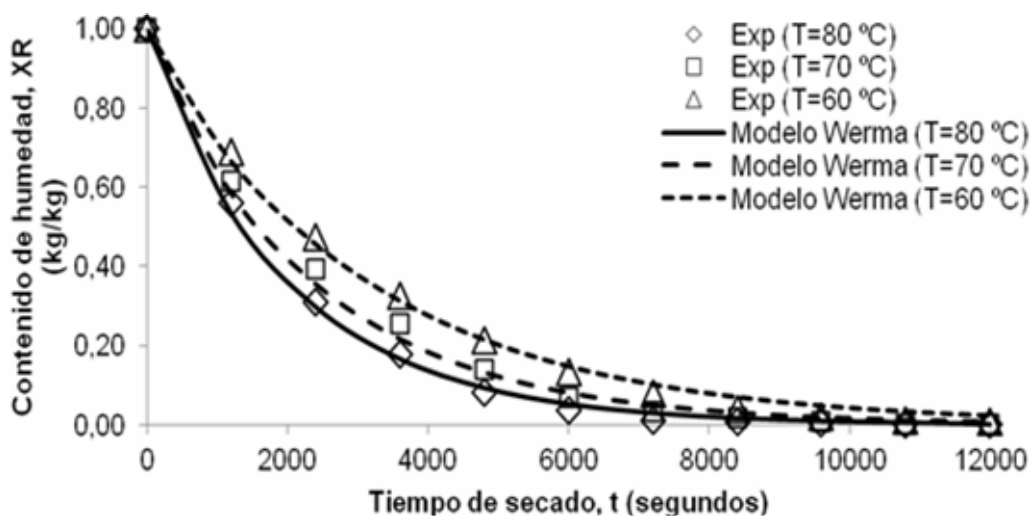


Fig. 4: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 4 m/s y espesura de 7×10^{-3} m.

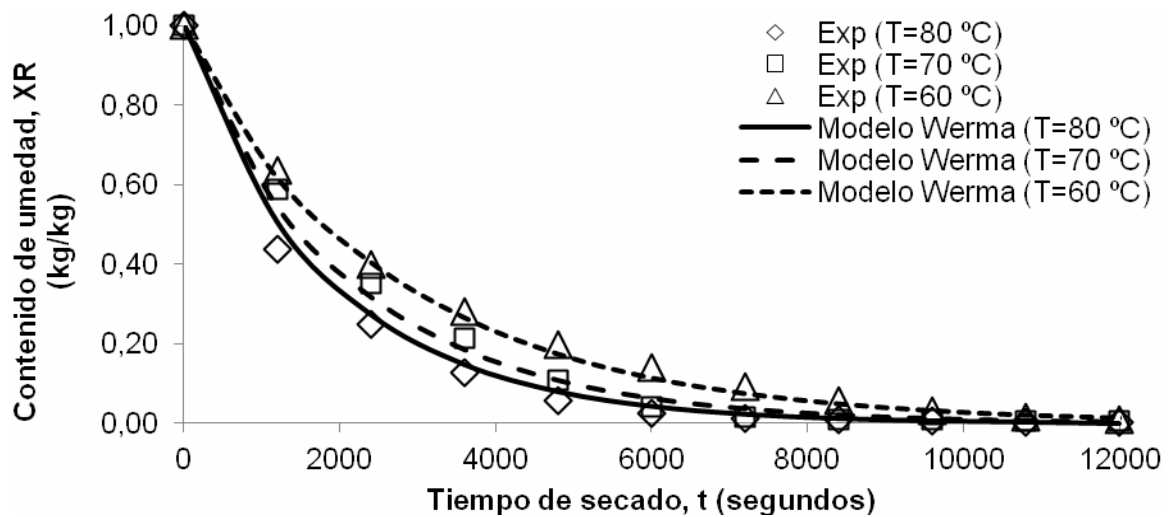


Fig. 5: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 5 m/s y espesura de 7×10^{-3} m.

Las Figuras 6 hasta la 8, presentan comparaciones entre resultados experimentales y resultados obtenidos con el modelo Logarítmico para el contenido de humedad frente al tiempo de secado para rebanadas de cajuil con espesura de 10×10^{-3} m y velocidades de 3, 4 e 5 m/s, respectivamente.

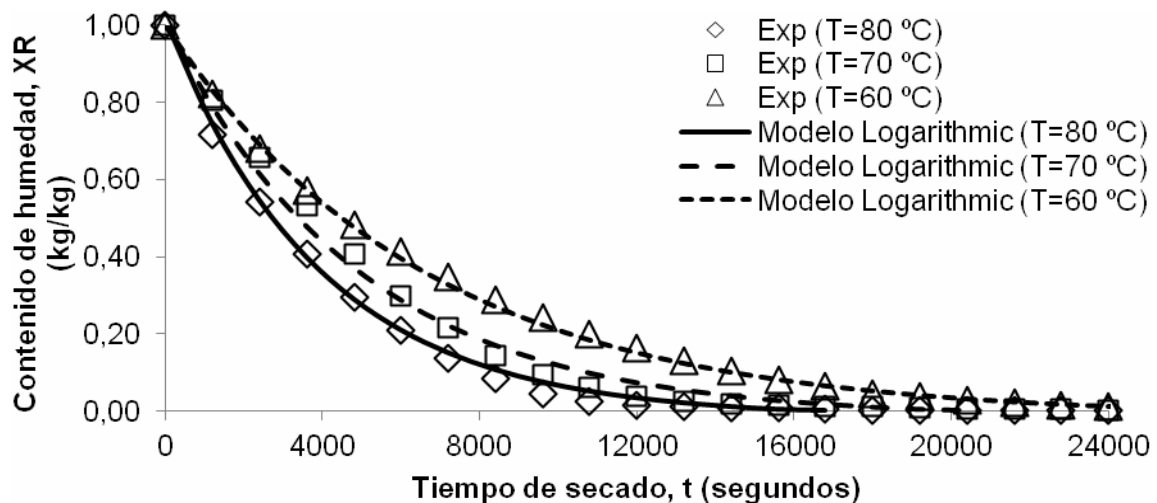


Fig. 6: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 3 m/s y espesura de 10×10^{-3} m.

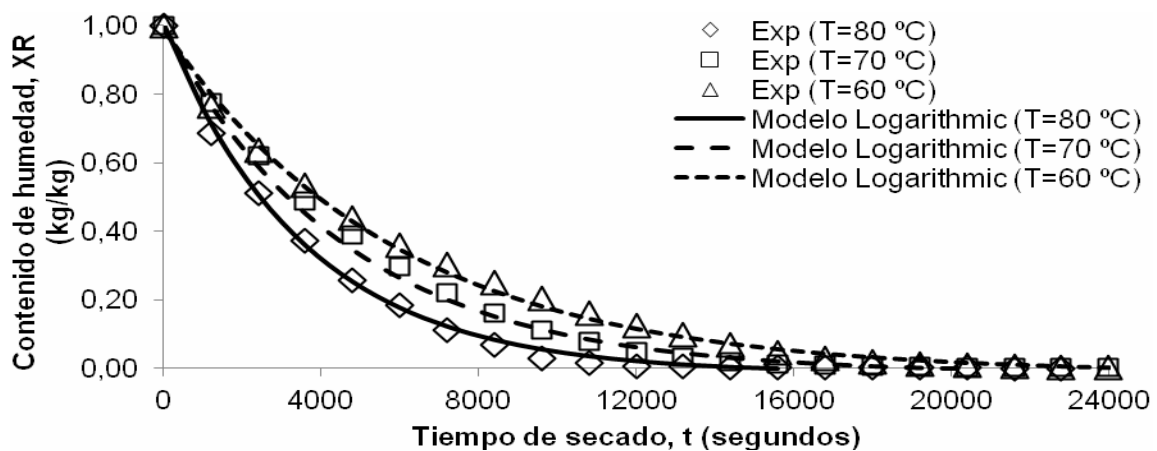


Fig. 7: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 4 m/s y espesura de 10×10^{-3} m.

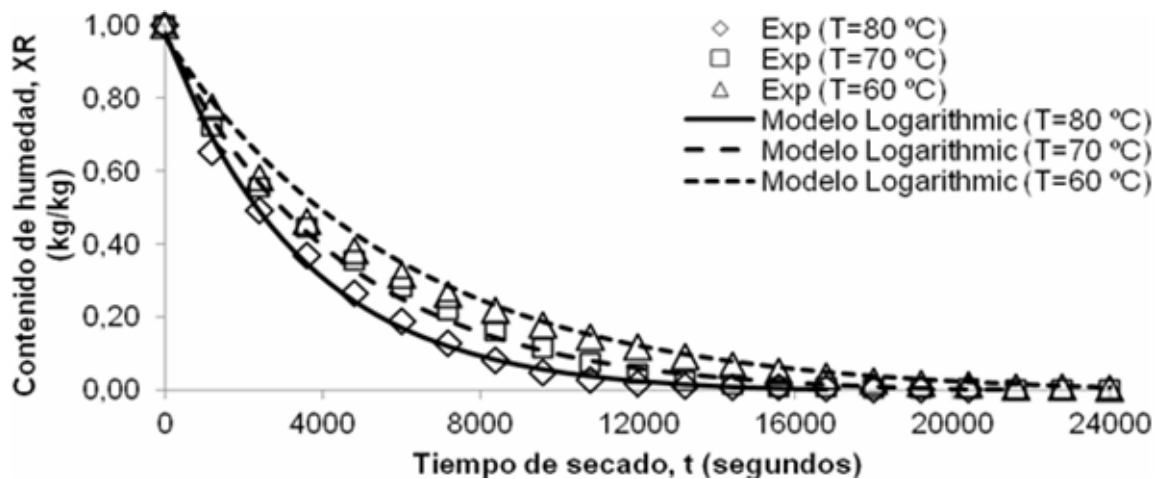


Fig. 8: Variación de los resultados de XR, para la velocidad de 5 m/s y espesura de 10×10^{-3} m.

En la Figura 8, para una velocidad fija de 5 m/s, se varió la temperatura y en la Figura 9, para una temperatura fija de 80 °C se varió la velocidad, tomando como ejemplo el modelo Logarítmico, para la espesura de 10×10^{-3} m. Se observó en los resultados obtenidos, mostrados en las Figuras 8 y 9, que la temperatura tiene una fuerte influencia en el proceso de secado, y que la velocidad del aire no tiene mucha influencia en este proceso. También se puede observar en las Figuras 3 a la 8, que cuanto mayor es el espesor de la muestra, mayor es el tiempo de secado. Resultados semejantes fueron obtenidos por Machado et al. (2010).

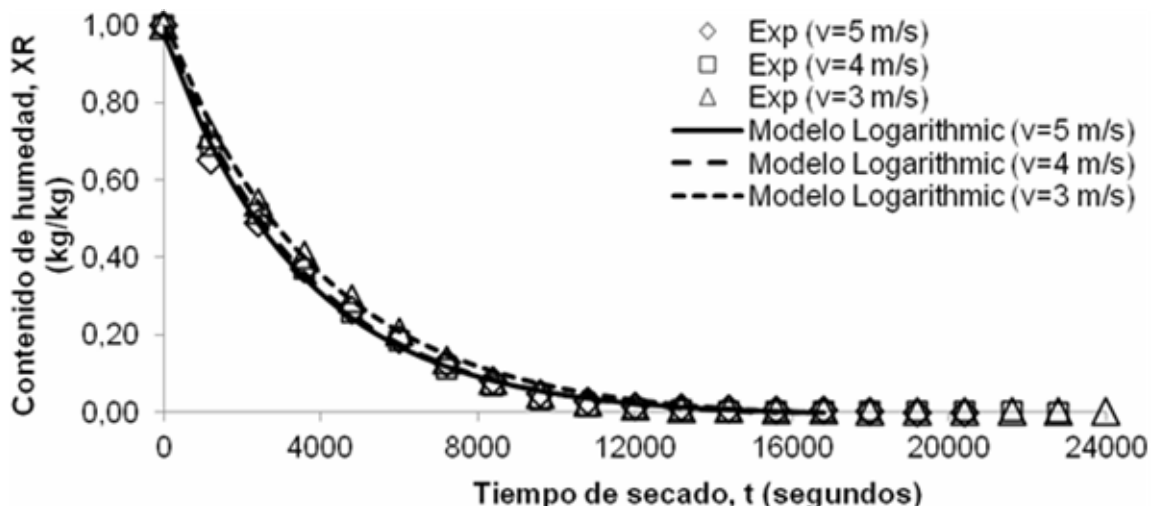


Fig. 9: Variación de los resultados de XR, para la temperatura de 80°C y espesura de 10×10^{-3} m.

En el proceso de secado del cajuil, vale la pena resaltar que esta fruta contiene una gran concentración de humedad, aproximadamente de 88%, y que las muestras presentaron encogimientos medios significativos en la orden de 46%, 38% y 36% para los espesores de 4, 7 y 10×10^{-3} m respectivamente. Este encogimiento, causó una variación de la velocidad del aire en el plano de la muestra. Para poder analizar el porqué de la no influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado, se evaluó el coeficiente de convección, utilizándose correlaciones para el número de Nusselt medio en este tipo de flujo. Sabiendo que el aumento de la velocidad debe provocar un aumento en el coeficiente de convección y consecuentemente un aumento de la transferencia de calor para el interior de la muestra, y basado en la analogía entre transferencia de calor y masa debería haber un aumento en las tasas de humedad retirada. Sin embargo, como esto no fue verificado en el presente estudio, se entiende que se hace necesario una investigación adicional, en los mecanismos de flujo del fluido interno, de modo de verificar cuales efectos prevalecen en el mecanismo de secado para una rebanada de cajuil, es decir, si el efecto es difusivo, capilar o ambos.

La Figura 10 muestra la velocidad de secado frente al contenido de humedad para un ensayo experimental con velocidad de aire de 4 m/s y tres diferentes temperaturas externas. Puede ser observado en la figura un comportamiento típico de secado de materiales biológicos donde hay ausencia de un periodo de velocidad de secado constante, prevaleciendo una reducción de la velocidad de secado con la caída del contenido de humedad del producto. De acuerdo con Seth y Sarkar (2004) el periodo de velocidad constante, tan común en materiales porosos, no está presente en el secado de alimentos debido a la peculiaridad de su estructura y posiblemente a variaciones en las propiedades químicas y físicas para condiciones de menor contenido de humedad.

El coeficiente de difusión efectiva fue determinado utilizando a ecuación de transferencia de masa unidimensional transitoria para placa plana con coeficiente de difusión constante, Ecuación (16), que normalmente se conoce como segunda ley de Fick de difusión (Crank, 1975)

$$\frac{\partial(XR)}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial(XR)}{\partial y} \quad (16)$$

Para una condición inicial de contenido de humedad uniforme en la placa ($XR[y, 0] = XR_0$ en $t = 0$) y condiciones de contorno de simetría en el espesor medio de la placa ($\frac{\partial(XR)}{\partial y} = 0$ en $y = 0$) y humedad conocida en su superficie ($XR = XR_s$ en $XR = L$), la solución analítica de esta ecuación resulta en un perfil de contenido de humedad de la placa que integrado en todo el dominio físico (desde $y = 0$ a $y = L$) permitirá obtener el contenido de humedad medio en función del tiempo, Ecuación (17).

$$\overline{XR} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left(- (2j+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2}\right) \quad (17)$$

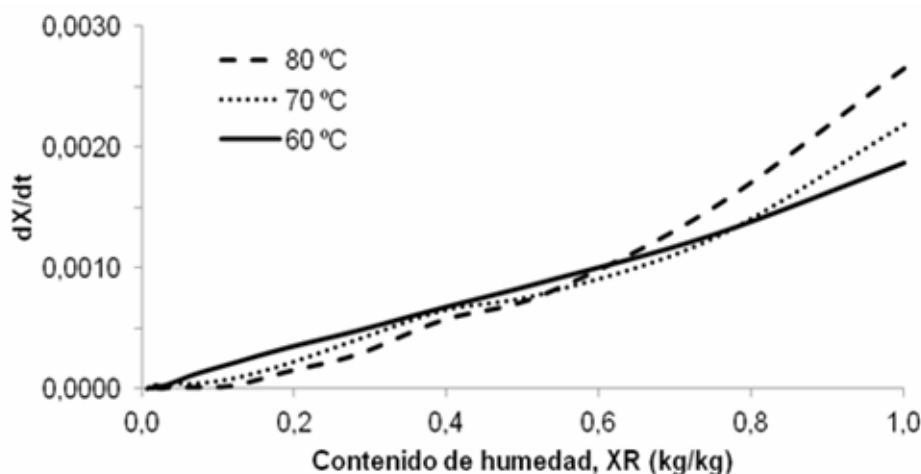


Fig. 10: Velocidad de secado frente al contenido de humedad

Ajustando la Ecuación (17) a los datos experimentales puede ser determinado el coeficiente de difusividad efectiva. Sólo se consideró un término en la serie ya que los términos adicionales no causan gran influencia en el resultado final. Para una variación de temperatura de aire de 60 a 80°C o valor del coeficiente de difusividad efectiva varía entre $7,43$ a $24,75 \times 10^{-10}$ m²/s desconsiderando en este análisis que la muestra encoje durante el secado. Si se toma en cuenta que la muestra encoje y para un valor medio de L para cada experimento, es obtenido un valor de difusividad efectiva menor que varía entre $3,05$ a $10,71 \times 10^{-10}$ m²/s. Estos valores de difusividad están de acuerdo en orden de magnitud con resultados publicados en la literatura para productos semejantes (Doymaz, 2007 y Aragão, 2007).

La energía de activación puede ser determinada de una ecuación tipo Arrhenius que relaciona el efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva (Ecuación (18)). En esta ecuación D_0 es el factor de Arrhenius en (m^2/s), E_a es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante universal de los gases (kJ/mol K) y T es la temperatura (K).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (18)$$

Sobre la base de datos de difusividad efectiva calculada de los datos experimentales y utilizando la Ecuación (18) fue determinada la energía de activación de las muestras de cajuil. Los resultados indican un valor de energía de activación de magnitud igual a 24,88 kJ/mol.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se concluye que los modelos Werma et al., y Logarítmico, presentan el mayor coeficiente de determinación y los menores valores del error medio cuadrado y del chi-cuadrado, en base a lo cual fueron elegidos para el modelado del secado de rebanadas de Cajuil en este trabajo. Sin embargo, lo anterior no descarta la aplicabilidad de los demás modelos estudiados al caso de estudio, a excepción del modelo de Wang & Singh que ha presentado los parámetros estadísticos más desfavorables y del modelo Modified Page equation II que considera en su ecuación el espesor de la muestra causando desvíos en relación a los resultados experimentales cuando la muestra encoje durante el proceso de secado.

Al notar que el aumento de la velocidad no ha mejorado el proceso de secado, se concluye que hay la necesidad de una investigación adicional, sobre los mecanismos de transferencia que predominan el fenómeno de secado de una rebanada de Cajuil, es decir, si el efecto es difusivo, capilar o ambos.

AGRADECIMIENTOS

A la CAPES/FACEPE por el soporte financiero.

REFERENCIAS

Akpinar, E.K.; *Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetable and fruits*, Journal of food engineering, 73, 75-84 (2006).

Akpinar, E.K.; Bicer, Y., *Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun*, Energy Conversion & management, in press, p.9 (2008).

Aragão, R.F., *Secagem de Fatias de Caju (Anacardium Occidentale L.) em Secadores de Bandejas*, tesis de Doctorado, Engenharia de procesos, C. Grande-PB- Brasil, 126 pp., (2007).

Ayensu, A., *Dehydration of food crops using solar dryer with convective heat flow*, Solar Energy, 59, 121–126 (1997).

Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, 2ª ed., Clarendon Pres, Oxford (1975).

Browne, M. W., y Cudeck, R., *Alternative ways of assessing model fit, Testing structural equation models*, 1ª ed, In K. Bollen & S. Long (Eds.), p.136-162, Newbury Park, NJ, Sage (1993).

Diamante, L. M., y Munro, P. A., *Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices*, International Journal of Food Science and Technology, 26, 99-109 (1991).

- Doymaz, I., *Air-drying characteristics of tomatoes*, Journal of Food Engineering, 78, 1291–1297 (2007).
- Henderson, S. M., y Pabis, S., *Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients*, Journal of Agricultural Engineering Research, 6, 169–174 (1961).
- IBGE, *Levantamento sistemático da produção agrícola pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil*, http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201102.pdf, acceso: febrero (2011).
- ISO 5801, *Industrial fans-performance testing using standardized airways*, 232, Suecia (1997).
- Lee, J. H., y Kim, H. J.; *Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices*, Food Science and Technology, 42, 180–186 (2009).
- Machado, A.V.; Oliveira, E.L.; Santos, E.S., y Oliveira, J. A., *Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale* L.) mediante Secador Solar de Radiación Directa*, Informacion. tecnol., 21, 1, 31-37 (2010).
- Menges, H.O., y Ertekin, C., *Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums*; Energy Convers Manage, 47(15–16), 2337–2348 (2006).
- Midilli A, Kucuk H, y Yapar Z., *A new model for single layer drying*; Drying Technology, 20(7), 1503–1513 (2002).
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Keyhani, A., y Djomeh, Z.E., *Moisture content modeling of sliced kiwifruit during drying*, Pakistan Journal of Nutrition, 8(1), 78-82 (2009).
- Park, K. S., Vohnikova, Z., y Brod, F. P. R., *Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha* L.)*, Journal of Food Engineering, 51, 193–199 (2002).
- Seth, D. Sarkar, A., *A lumped parameter model for effective moisture diffusivity in air drying of foods*, Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing, 82(C3): 183–192, (2004)
- Strumillo, C., y Kudra, T., *Drying: Principles, Applications and Design*, 1ª ed., v.3, Gordon and Breach Sciences Publishers, London (1989).
- Taco-Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, Versão 2, *Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação – NEPA e UNICAMP-Campinas – SP-Brasil* (2006).
- Togrul, I. T., y Pehlivan, D., *Modeling of drying kinetics of single apricot*, Journal of Food Engineering, 58, 23–32 (2003).
- Xanthopoulos, G.; Oikonomou, N.; y Lambrinos G., *Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs*; Journal of food engineering, 81, 553-559 (2007).
- Yaldiz O., y Ertekin C., *Thin layer solar drying of some vegetables*; Drying Technology, 19, 583–596 (2001).
- Yaldiz, O., Ertekin, C., y Uzun, H.I., *Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes*, Energy, 26, 457-465 (2001).
- Wang, C.Y., y Singh R.P., *A single layer drying equation for rough rice*, American Society of Agricultural, St. Joseph MI, 78, 3001 (1978).