

Estudio de la cinética de secado de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.)

José **Hernández-Rodríguez**¹
Antonio **Fernández-Castillo**¹
Pedro **Quinto-Diez**²
Fernando Enrique **Flores-Murrieta**¹
Roberto **Acosta-Olea**¹

¹Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo.
Blvd. Bahía s/n Esq. I. Comonfort Col. Del Bosque
Chetumal, Quintana Roo.
MEXICO.

²LABINTHAP, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional.
Edificio 5, 3^{er} piso, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
México, DF.
MEXICO.

Teléfonos: ¹01-983-83-503-91

²01-57-29-60-00 ext. 54754

correo electrónico (email): josherna@correo.uqroo.mx
pqd510@hotmail.com

Recibido el 17 de diciembre de 2009; aceptado el 18 de marzo de 2011.

1. Resumen

En este trabajo, se presenta un análisis del proceso de secado del jitomate en rodajas. Para llevar a cabo este estudio, se realizaron pruebas de secado de jitomate en rodajas de 5 mm de espesor, a las temperaturas de 50, 55 y 60°C; con dos velocidades diferentes del medio secante de 1.5 y 2.5 m/s; y utilizando un pretratamiento de escaldado. Los resultados experimentales se han comparado con respecto a los obtenidos a través del modelo analítico de Page, encontrándose en general una buena concordancia entre ambos resultados.

Palabras clave: secado, jitomate.

2. Abstract (Study of Drying Kinetics of Tomato, *Solanum lycopersicum* L.)

This work presents an analysis of the drying process of tomato slices. To carry out this study, tomato slices of 5 mm thick

were tested at temperatures of 50, 55 and 60°C, with two different drying media speeds, and using a pretreatment of scalding. Experimental results were compared with respect to those obtained with the Page's analytical model, found in general a good consistent with the experimental results.

Key words: drying, tomatoe.

3. Introducción

La tomatera (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta de la familia de las solanáceas (*Solanaceae*) originaria de América y cultivada en todo el mundo por su fruto comestible, llamado tomate (o jitomate en el sur y centro de México). Dicho fruto es una baya muy coloreada, típicamente de tonos que van del amarillento al rojo, debido a la presencia de los pigmentos licopeno y caroteno. Posee un sabor ligeramente ácido y mide de 1 a 2 cm de diámetro en las especies silvestres, y suele ser mucho más grande en las variedades cultivadas.

El jitomate es un alimento muy apreciado en diversas partes del mundo, debido a su escasa cantidad de calorías (100 g de jitomate aportan solamente 18 kcal), además de constituir una fuente importante de ciertos minerales tales como el potasio y el magnesio, así como de vitaminas, entre las que destacan las siguientes: B1, B2, B5 y C.

La mayor parte de su peso es agua y el segundo constituyente en importancia son los hidratos de carbono. Los azúcares simples que contiene le confieren un ligero sabor dulce y algunos ácidos orgánicos le otorgan un cierto sabor ácido que le caracteriza. El jitomate, presenta también carotenoides como el licopeno (pigmento que le da su color rojo característico).

En México, la superficie dedicada al cultivo de jitomate es de 75 mil hectáreas que en el año de 2005 representó un total de 2.5 millones de toneladas cultivadas, con un valor de cerca de 8 mil millones de pesos [1], lo que hace que sea una de las especies hortícolas de gran importancia tanto económica como social en México, ya que representa 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas [2] y su cultivo está asociado con 500 000 empleos directos.

Del tomate mexicano, 70 % es exportado a Estados Unidos y sólo logra complementar la demanda estadounidense durante

la etapa invernal, comercializándose principalmente en los mercados del sur y oeste de Estados Unidos.

En México, esta hortaliza se comercializa en un 85% en fresco, existiendo épocas del año en las que se incrementa significativamente su oferta, ocasionando una saturación estacional en el mercado nacional, trayendo como consecuencia una disminución en los precios y pérdidas económicas para el productor, ya que frecuentemente no recupera sus costos de producción.

Una alternativa a esta problemática es, por una parte, diversificar los mercados para este producto sobre todo con aquellos países con los que México tiene acuerdos comerciales y, por otra, darle valor agregado, deshidratándolo, ya que existen nichos de mercado (comunidades italianas en EU y Canadá) que debido a su cultura culinaria, demandan un gran volumen de tomates secos. Para poder ofertar una propuesta de exportación de tomates deshidratados a mediano plazo, es necesario desarrollar los procesos que permitan asegurar la calidad final de dicho producto.

Así, en diversas partes se han realizado estudios sobre el secado del jitomate. Entre estos estudios destacan los siguientes: *a)* Khazaei [3] analizó el efecto de la temperatura del aire de secado en la calidad final de rodajas de jitomate, empleando temperaturas dentro del rango de 60 a 120°C; *b)* Lewicki [4] estudió el efecto del pretratamiento con una solución de calcio en el secado; *c)* Movagharnejad desarrolló una técnica de modelación del proceso de secado con base en redes neuronales; *d)* Karel [6] realizó un estudio sobre la influencia de un pretratamiento osmótico en el secado; *e)* Rajkumar [7] analizó el secado de tomate al vacío, y *f)* Queiroz [8] lo realizó través de secadores con bombas de calor.

En el presente trabajo, se presenta el estudio del secado del jitomate en rodajas en un secador convectivo tipo túnel, a bajas temperaturas (50, 55, y 60°C), y con velocidades del medio secante de 1.5 y 2.5 m/s, con un pretratamiento por escaldado.

4. Desarrollo experimental

La metodología empleada en el presente trabajo, tiene la siguiente secuencia: primero se selecciona y prepara el producto, posteriormente le realizan las pruebas de secado y finalmente se hace el análisis de los resultados obtenidos.

La primera parte de la metodología experimental consistió en adquirir el jitomate que se va a emplear durante las prue-

bas. Para esto, se compraron 6 kg de jitomate en el mercado local, buscando que tuviese el mismo grado de maduración; posteriormente se lavaron y almacenaron a una temperatura de 4°C hasta el momento de su uso.

Una hora antes de los experimentos de secado se permitió que el producto se estabilizara a la temperatura ambiente para posteriormente cortarlo en rebanadas de 5 mm de espesor y se seleccionaron las muestras que se sometieron al proceso de escaldado, consistente en la inmersión en una solución de agua y limón, con la finalidad de evitar que el producto cambie su coloración durante el proceso de secado y aquellas otras para la determinación del peso seco.

5. Pruebas de secado

Para obtener la masa seca del jitomate se utilizó un horno eléctrico, en donde el producto se deshidrató a una temperatura de 90°C, verificando las variaciones de peso cada 20 minutos, hasta que pasadas dos horas no se detectó variación alguna del mismo. Para la medición del peso de las muestras se utilizó una balanza con un margen de error de ± 0.001 g.

Una vez obtenido el peso seco del jitomate, el contenido de humedad en base seca se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$X = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (1)$$

Para las pruebas de secado se empleó un prototipo de secador cuyo esquema se muestra en la figura 1. El dispositivo



Fig. 1. Instalación experimental.

experimental cuenta con un "variador", el cual permite controlar la corriente que pasa por las resistencias eléctricas, y de esta forma se logra controlar la temperatura. De la misma forma se diseñó un control de velocidad de los ventiladores para regular el flujo de aire.

El equipo se pone en operación media hora antes del experimento para que se establezcan las condiciones de secado.

Las pruebas de secado, se realizaron procurando mantener una variación en la temperatura del medio secante de $\pm 1^\circ\text{C}$ durante el proceso.

Las muestras se fueron pesando en intervalos regulares para verificar la pérdida de humedad y, asimismo, se mantuvo un registro constante de la humedad relativa del medio secante.

Cabe hacer mención, que en esta determinación del contenido de humedad del producto, se registraron grandes variaciones, lo cual es normal y se relaciona con la anisotropía del producto, que en el caso de los alimentos es muy marcada.

En general, el peso inicial promedio en las muestras fue de 40 g, y el peso seco en promedio obtenido en el horno corresponde a un valor de 0.4 g.

Las pruebas de secado se realizaron a las temperaturas de 50, 55 y 60°C , y con velocidades de 1.5 y 2.5 m/s. Estas condiciones se seleccionaron considerando que, según diversos investigadores [8], con el uso de temperaturas de secado menores a 65°C , los productos generalmente no experimentan pérdidas en sus propiedades alimenticias, sin embargo a temperaturas menores de 50°C conducen a tiempos muy largos de secado.

El proceso de secado se mantiene hasta que en un lapso de una hora no se observan variaciones de peso. Posteriormente el producto se deja a la temperatura ambiente durante 20 minutos antes de empacarse en bolsas de polietileno.

En la figura 2 se presentan los valores experimentales obtenidos de las pruebas, graficando la relación de humedad del producto con respecto al tiempo de secado.

Como puede observarse en la figura 2, la temperatura tiene un efecto más significativo en la pérdida de humedad que la velocidad del medio secante.

6. Cinética del secado de jitomate

Para modelar la cinética de secado del jitomate se hace uso de la ecuación de la segunda ley de Fick, cuya solución en el

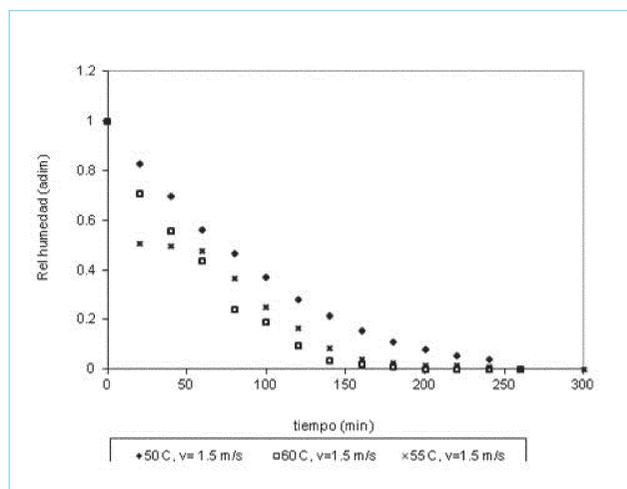


Fig. 2. Pérdida de humedad con respecto al tiempo para las pruebas de secado del jitomate.

caso de una placa plana, considerando que la migración de la humedad es causada por la difusión, sin encogimiento, y bajo coeficientes de difusión y temperatura constantes, es la siguiente:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (2)$$

Normalmente, la ecuación (2) se puede simplificar al primer término de la serie [9], y para ese caso queda como:

$$\ln \frac{M}{M_0} = \ln \frac{8}{\pi} - \left[\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

La ecuación (3) permite calcular la difusividad efectiva de un producto a través de graficar los datos experimentales del proceso de secado en términos del $\ln M_R$ contra el tiempo de secado, tal y como se observa en la figura 3.

Cabe señalar que la mayoría de los modelos de secado, no consideran el efecto del encogimiento, con el fin de simplificar las soluciones de las ecuaciones implicadas. Algunos estudios sugieren que el error que se introduce por no considerar el encogimiento es de un 3% [10], lo cual no es muy significativo y los modelos de ecuaciones empíricas se ajustan normalmente bastante bien a los resultados experimentales.

Ahora bien, para calcular la incertidumbre en las mediciones, se ha utilizado el método de Kline y McClintock [11] de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w_R = \left[\left[\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right]^2 + \left[\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Así, el error global de las mediciones se obtiene con la suma de la incertidumbre de todas las fuentes, obteniéndose los valores señalados en la tabla 1.

Cabe señalar que en los resultados mostrados en la tabla 1 ya se ha agregado un 3% por el error que se considera se induce por no considerar el encogimiento del producto.

También se indica que las pruebas se realizaron con cuatro repeticiones para cada una y la desviación encontrada en los resultados fue de un 3%, lo que permite asegurar la repetitividad de las mismas.

Como se observa en las gráficas representadas en la figura 3, los valores del logaritmo natural de la relación de humedad, se pueden ajustar a una línea recta, cuya pendiente está relacionada con la difusividad efectiva de la siguiente forma:

$$\text{Pendiente} = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \quad (5)$$

Cabe señalar que en la figura 3 se ha señalado el valor de R^2 , el cual como puede observarse es mayor a 0.9, lo cual indica que se tiene baja dispersión de los datos experimentales.

Posteriormente, a partir de la ecuación (4), se calcula el valor del coeficiente de la difusividad efectiva para las rebanadas de jitomate, y cuyos resultados se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos.

T (°C)	V(m/s)	R^2	D_{eff} (m ² /s)(e-8)	k	n	error (%)
50	1.5	0.99	2.90945	0.01148	0.985	6
55	1.5	0.95	3.82316	0.01509	0.967	8
60	1.5	0.97	5.57031	0.0177	0.979	6
50	2.5	0.98	4.66044	0.0183	1.032	7
55	2.5	0.98	5.03931	0.0198	1.039	8
60	2.5	0.93	6.44305	0.0181	1.023	9

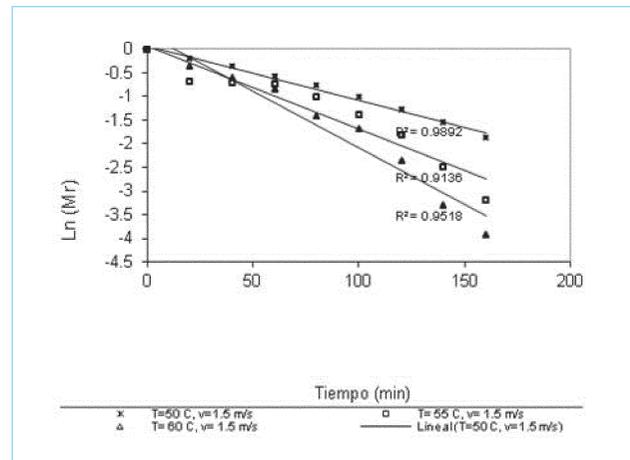


Fig. 3. Gráfica del $\ln(M_r)$ con respecto al tiempo para la velocidad del medio secante de 1.5 m/s.

Marinos-Kouris [12] ha recopilado los datos publicados en los últimos 15 años sobre valores de coeficientes de difusión de algunos materiales comunes, y señala que la difusividad de los alimentos normalmente se ubica en un rango de 10^{-13} a 10^{-6} m²/s, y la mayoría de ellos (82%) están acumulados en la región de 10^{-11} a 10^{-8} . En el presente estudio, los valores obtenidos de la difusividad se encuentran dentro de dicho intervalo.

Por otra parte, el comportamiento del proceso de secado se ha modelado utilizando el modelo de Page [13], el cual se puede expresar por la ecuación:

$$M_r = \exp(-kt^n) \quad (6)$$

En la ecuación (6) las constantes de la rapidez de secado (k y n) se han estimado aplicando una técnica de regresión lineal, y los valores obtenidos se señalan en la tabla 1.

Una vez obtenidos los valores de las constantes del modelo de Page, se construyen las curvas de secado correspondientes y se comparan con respecto a los valores experimentales.

En la figura 4, se presenta el caso de las curvas que corresponden a la velocidad del medio secante de 1.5 m/s.

En general, como puede observarse de la figura 4, existe una buena concordancia entre los datos experimentales y los que se obtienen con la ecuación de Page.

En la figura 5 se presenta la comparación de las curvas de secado para una velocidad de 2.5 m/s. Como se puede apre-

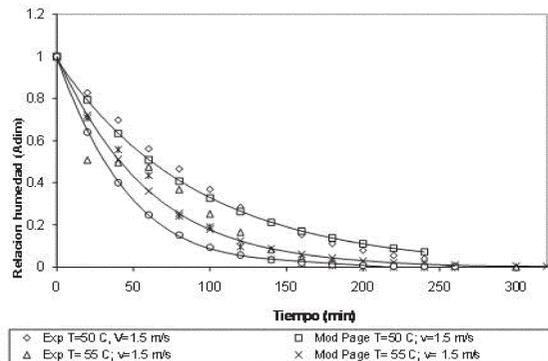


Fig. 4. Comparación de curvas de secado para la velocidad del medio secante de 1.5 m/s.

ciar, la temperatura no tiene el mismo efecto que en el caso anterior, en donde a mayor temperatura se obtenía una rapidez de secado más grande. En este caso la velocidad parece tener un efecto significativo al producir un enfriamiento del producto, por lo que no se logra mejorar la velocidad de secado, sino por el contrario ésta se reduce.

Este efecto que ya ha sido señalado por otros investigadores, como Ndukwu [14], indicando que se presenta en algunos casos, sobre todo en productos de origen agrícola.

Finalmente en la figura 6 se presenta una comparación de las muestras del jitomate antes y después del secado. En dicha figura se puede apreciar que el producto conserva su co-

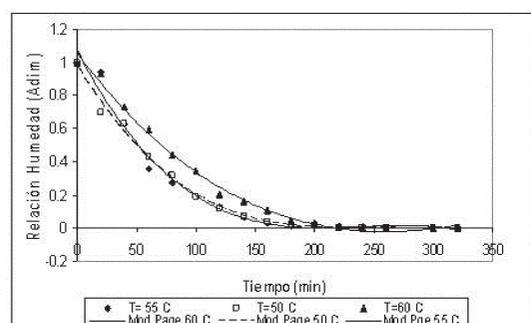


Fig. 5. Comparación de curvas de secado para velocidad de 2.5 m/s.

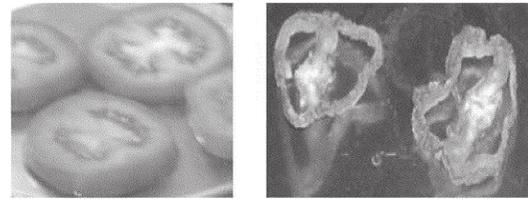


Fig. 6. Comparación de las rebanadas de jitomate: a) fresco, b) seco.

loración original, lo cual es, en gran medida, gracias al pretratamiento de escaldado.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el proceso de secado del jitomate en rebanadas, analizando la influencia de la temperatura y la velocidad del medio secante en el proceso. Se ha comprobado que la temperatura es el factor que afecta más significativamente el secado.

Los coeficientes de difusividad efectiva obtenidos en este trabajo para el jitomate bajo las condiciones de temperatura y velocidad del medio secante estudiadas se han comparado con respecto a valores que otros investigadores han reportado para dicho producto, encontrándose una buena concordancia.

Finalmente cabe señalar que el secado realizado con el tratamiento de escaldado ha permitido obtener un producto con un buen aspecto final.

Simbología

W	peso total (kg)
W_s	peso seco (kg)
M_R	relación de humedad (Adim)
M	contenido de humedad en un instante cualquiera (%)
M_0	contenido de humedad inicial (%)
M_e	contenido de humedad en equilibrio (%)
D_{eff}	difusividad efectiva (m^2/s)
L	espesor (m)
t	tiempo (min)
k	coeficiente del modelo de Page
n	coeficiente del modelo de Page

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló con el apoyo recibido al proyecto titulado: "Estudio del secado de productos agrícolas con energía solar", por parte de la DCI de la Universidad de Quintana Roo.

8. Referencias

- [1] <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>
- [2] A. Casp y J. Abril. *Procesos de conservación de alimentos*, 2ª ed., pp. 10-22, 1998.
- [3] J. Khazaei, G. Chgini y M. Bakhshiani. "A Novel Alternative Method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: superposition technique", *Drying Technology*, vol. 26, 2008, pp. 759-775.
- [4] P. Lewicki y E. Michaluk. "Drying of tomato pretreated with calcium", *Drying Technology*, vol. 22, núm. 2, 2004, pp. 1813-1827.
- [5] K. Movagharnejad y M. Nikzad, "Modeling of tomato drying using artificial neural network", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 59, 2007, pp. 1-2, 78-85.
- [6] R. Karel, M Rangel, M. Martins y V. Silveira. "Drying kinetics of tomatoes submitted to a previous osmotic treatment", *Drying Tech., Proc. of 14th International Drying Symposium*, vol. C, 2004, pp. 2133-2140.
- [7] P. Rajkumar; S. Kulanthaisami, G. S. V. Raghavan, Y. Gariépy y V. Orsat, "Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods", *Drying Technology*, 2007, pp. 1349-1357.
- [8] R. Queriroz, L. Gabas y V. N. Telis, "Drying kinetics of tomato by using electric resistance and heat pump dryers", *Drying Technology*, 2004, vol. 22, núm. 7, pp. 1603-1620.
- [9] X. Dong Chen, *Drying Technologies in Food Processing*, 2008, pp. 55-86.
- [10] Kamil S., "The thin-layer modelling of tomato drying process", *Agriculturae Conspectus Scientificus*, vol. 72, núm. 4, 2007, pp. 343-349.
- [11] J. Holman, *Métodos experimentales para Ingenieros*, México DF: McGraw-Hill, 1988.
- [12] D. Marinos-Kouris y Z. B. Maroulis. *Transport properties in the drying of solids*, in *Handbook of drying technology*, Chapter 4, 3ª ed., 2006.
- [13] J. Hernández Rodríguez, "Estudio teórico experimental del secado de medios porosos de medios porosos en presencia de esfuerzos", tesis de doctorado, ESIME Instituto Politécnico Nacional, México DF, México, 2006.
- [14] M. C. Ndukwu, "Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean", *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript 1091, vol. XI, abril, 2009.

DOAJ

Directory of Open Access Journals

20% of peer-reviewed articles are now freely available

<http://www.doaj.org>