

MODELACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN DE JITOMATE Y NOPAL POR DOS MÉTODOS DE SECADO (AIRE CALIENTE Y RADIACIÓN INFRARROJA)

G.S. Mosqueda Sánchez, M. del R. Abraham Juárez, J.A. Gómez Salazar y M.E. Sosa Morales*

Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca, Carretera Irapuato-Silao Km-9, Irapuato, Gto., México, C.P. 36500, *msosa@ugto.mx

RESUMEN:

El jitomate (*Lycopersicon esculentum*) y el nopal (*Opuntia ficus-indica*) se encuentran entre los alimentos de mayor consumo en México. La industria de alimentos busca obtener productos deshidratados de dichos alimentos, a fin de conseguir una mayor vida útil y disminuir sus pérdidas en poscosecha. Sin embargo, la selección de un método de secado adecuado, la determinación de los parámetros óptimos de operación y el conocimiento de las propiedades físicas del alimento son esenciales para alcanzar una elevada calidad en productos. Por ello, se estudió el secado de láminas de jitomate y nopal a partir de secado por aire caliente en túnel y secado por radiación infrarroja. Se determinaron las cinéticas de deshidratación y se aplicaron modelos empíricos y difusionales para describir el proceso y calcular los coeficientes de difusión. Los resultados indicaron que el secado por radiación infrarroja produce mayor deshidratación de las muestras en menos tiempo en comparación del secado por túnel. Los valores de los coeficientes de difusión variaron entre 8.65×10^{-7} y $2.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

ABSTRACT:

Tomato (*Lycopersicon esculentum*) and cladodes from *Opuntia ficus-indica*, named "nopal" or "nopalitos" are foods highly consumed in Mexico. The food industry try to extend the shelf-life of this kind of foods through drying processes. However, the selection of an adequate drying method, determination of operation parameters and knowledge of physical properties are key factors to reach a high quality in the final dry product. Thus, the drying of tomato and nopal slabs was studied. Both air-tunnel and infrared drying methods were evaluated. Dehydration kinetics were determined and several empirical and diffusional models were applied in order to describe the process. Infrared radiation resulted in higher dehydration in the studied foods, with shorter times in comparison with air tunnel. Diffusion coefficients values were between 8.65×10^{-7} y $2.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Palabras clave: Modelos matemáticos, Difusión, deshidratación, jitomate, nopal

Keywords: Mathematical models, diffusion, drying, tomatoes, nopal

Area: Modelación de procesos

INTRODUCCIÓN

Entre los alimentos que más se producen y consumen en México, se encuentran el Tomate (*Lycopersicon esculentum*) y el Nopal (*Opuntia ficus-indica*). El jitomate es una de las hortalizas que tienen más demanda en el mercado, en donde se usa como ingrediente en sopas, salsas, ensaladas y condimento. De forma similar, el Nopal es consumido en fresco y en mayor proporción como ingrediente distintivo de la comida Mexicana (Medina-Torres et al., 2008). De allí que en los últimos años se ha incrementado el interés por la industria de alimentos de obtener productos deshidratados de dichos alimentos, por un lado a fin de conseguir una mayor vida útil

en alimentos a base de Jitomate, además que es un producto altamente perecedero (mayor al 90%) con alta variedad de transformación (Ruiz Celma et al., 2012) y, por otro lado, en el caso de Nopal, menores pérdidas en poscosecha, en donde se genera gran cantidad de residuos, alrededor del 50% (Medina-Torres et al., 2008).

El secado es la técnica comercial de deshidratación más comúnmente empleada en la industria de procesamiento de alimentos. En los últimos años se ha empleado de manera eficaz para incrementar la vida útil de varias frutas y hortalizas (Vasques et al., 2006). Dicho proceso generalmente se realiza por medio de energía térmica utilizando técnicas como secado con aire caliente, solar, microondas e infrarrojo, sin embargo, la exposición de alimentos a energía térmica puede afectar a las propiedades de los mismos, tales como la composición química, textura, color y sabor (Welti-Chanes et al., 2005).

Por lo tanto, la selección de un método de secado adecuado y la determinación de los parámetros óptimos de operación, son esenciales para lograr alcanzar una elevada calidad en productos además de un de mínimo costo y rendimientos máximos (Clemente et al., 2011, Sharma et al., 2009). El estudio de las cinéticas de secado es de gran utilidad para predecir las propiedades físicas de los alimentos. El objetivo de este trabajo fue modelar el proceso de deshidratación de Jitomate y Nopal por dos métodos de secado (aire caliente y secado por infrarrojo), y también obtener el coeficiente de difusión efectivo del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se adquirieron jitomate (*Lycopersicon esculentum*) variedad Saladette y nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la central de abastos de Irapuato, Gto. Los jitomates fueron lavados, se cortaron en rodajas con aproximadamente 0.5 cm de espesor. Las pencas se lavaron y se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio al 1% en un periodo de 5 min, se enjuagaron con agua y la humedad superficial se removió con papel, se cortaron en tiras de 15 mm x 35 mm x 3 mm aproximadamente. Se escaldó en agua a 80 °C durante 3 min e inmediatamente se enfriaron utilizando agua a 3°C (Martínez et al., 2010).

Deshidratación por túnel

Se utilizó un secador experimental tipo túnel con una resistencia eléctrica de 2000 W, equipado con un ventilador 170W y 233 m³/h de caudal de aire. Las muestras de Jitomate (50 g) y Nopal (30g) se sometieron al deshidratado por aire caliente a temperatura de 65°C. Se introdujeron en el secador, y se determinaron las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco. Se registró la pérdida de peso con una balanza digital para posteriormente construir las curvas de secado. Las muestras se voltearon cada 15 min.

Deshidratación por infrarrojo

Se utilizó un equipo de radiación infrarroja construido en la Universidad de Guanajuato, que incluye una lámpara de 250 W con un extractor de aire con una velocidad de 2 m/s, reóstato (Martínez et al., 2009), además de una rejilla de metal

perforada para la colocación de las muestras. En el equipo se introdujeron las muestras de Jitomate (50 g) y Nopal (30g) ubicándolas en el área de mayor incidencia infrarroja (elipse). La lámpara se colocó a una distancia de 16 cm de la muestra (Martínez et al., 2009), volteándolas cada 15 min.

Determinación del contenido de humedad

Se pesaron 2 g de muestra en Petri, a peso constante y se sometió a calentamiento en una estufa con ventilación a 110°C .

Modelado

Los modelos matemáticos aplicados frecuentemente para representar el secado de productos agrícolas se ajustaron a los datos experimentales de secado de Jitomate y Nopal, tanto para el secado por infrarrojo como para secado por túnel. Estos modelos se muestran en la Tabla 1. Se utilizó la técnica de regresión no lineal para obtener las constantes específicas en cada uno de los modelos seleccionados.

Tabla 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar las cinéticas de secado

Modelo	Ecuación
Newton	$XR = \exp (-kt)$
Page Modificado	$XR = \exp [-(kt)^n]$
logarítmico	$XR = a \exp (-kt) + c$
Henderson and Pabis	$XR = a \exp (-kt)$
Dos términos (Henderson)	$XR = a \exp (-kt) + b \exp (-gt)$
Wang and Singh	$XR = at^2 + bt + 1$
Thompson	$t = a \ln(XR)^2 + b \ln(XR)$
Aproximación de difusión	$XR = a \exp (-kt) + (1 - a) \exp (-kbt)$
Midilli - Kucuk	$XR = a \exp (-kt^n) + bt$
Verma	$XR = a \exp (-kt) + (1 - a) \exp (-kt)$

La bondad del ajuste de los datos experimentales de los modelos se calculó mediante el porcentaje de varianza explicada y el coeficiente de determinación múltiple R².

$$\% \text{ var} = \left(1 - \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \right) \text{ donde, } S_y^2 \text{ y } S_{yx} \text{ son las desviaciones estándar de la muestra y}$$

estimación

$$S_y^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i \text{exp}} - \bar{X}_{\text{exp}})^2}{N - 1} \right) \quad S_{yx}^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i \text{exp}} - X_{i \text{calc}})^2}{N - 2} \right)$$

donde X_{iexp} es el valor de la humedad observado, \bar{X}_{iexp} es el promedio de los valores de la humedad observada, X_{icalc} es el valor de la humedad calculada por el modelo y N es el número de determinaciones.

El coeficiente de difusión del agua se calculó suponiendo que el mecanismo principal es de naturaleza difusiva, por lo tanto, los resultados experimentales pueden ser interpretados a partir de la ecuación de la segunda ley de difusión de Fick:

$$\frac{dX}{dt} = Deff \frac{d^2 X}{dr^2}$$

La transferencia de la humedad puede ser asumida como un proceso de difusión unidimensional en la dirección ascendente desde la parte inferior del producto hacia la superficie del mismo. Bajo algunos supuestos, las condiciones iniciales y de contorno adecuadas para la solución de la ecuación anterior en una lamina de espesor L se pueden escribir de la forma siguiente

$$t = 0, 0 < r < L, X = X_0$$

$$t > 0, r = L, X = X_e$$

$$t > 0, r = 0, \frac{dX}{dr} = 0$$

donde X es el contenido de humedad, X_0 contenido inicial de humedad, X_e contenido de humedad en el equilibrio. Asumiendo las condiciones iniciales y de contorno anteriores, la solución analítica de la ecuación de la segunda ley de Fick es la siguiente (Crank, 1975):

$$XR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 Deff g}{4L^2}\right)$$

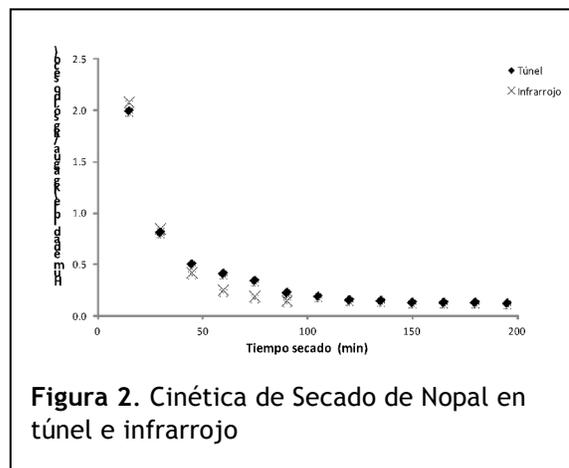
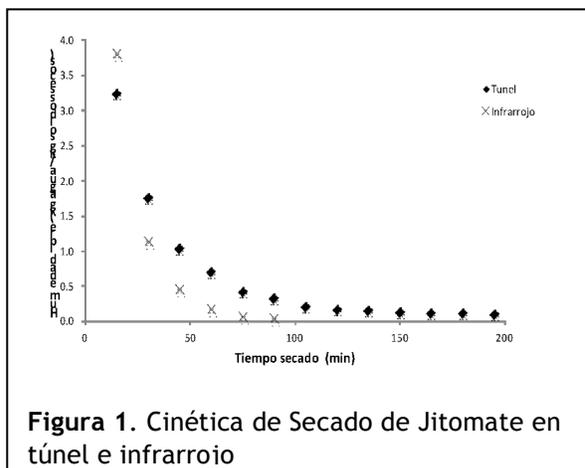
donde XR es la relación de la humedad adimensional, obtenida mediante la siguiente ecuación $XR = (X_t - X_e)/(X_0 - X_e)$, L es el espesor medio de la lamina (m); $Deff$ es el coeficiente de difusión efectivo ($m^2 s^{-1}$); y n es el número de parámetros de la ecuación.

RESULTADOS

Cinética de Secado

Se obtuvieron las curvas de secado para Jitomate y Nopal Figuras 1 y 2). Se observa una mayor pérdida de agua en las muestras sometidas a radiación infrarroja. Las muestras de Jitomate presentaron una reducción en el contenido de humedad de hasta 0.044 kg de agua/kg m.s cuando se trataron con radiación infrarroja durante 90 min, mientras que con aire caliente en túnel se redujo la humedad hasta 0.33 kg de agua/kg de m.s en el mismo tiempo de tratamiento, y 0.107 kg de agua/kg de m.s durante 200 min. Con relación a las muestras de Nopal, estas presentaron una disminución en el contenido de humedad de hasta 0.15 kg de agua/kg m.s al

someterse a radiación infrarroja durante 90 min, mientras que con aire caliente en túnel el valor fue de 0.23 kg de agua/kg m.s en el mismo tiempo de tratamiento, y 0.13 kg de agua/kg de m.s durante 200 min.



Modelos matemáticos

La Tabla 2 muestra los valores del porcentaje de varianza (% Var.) y el coeficiente de determinación (R^2) para cada modelo) para el secado de tomate y nopal.

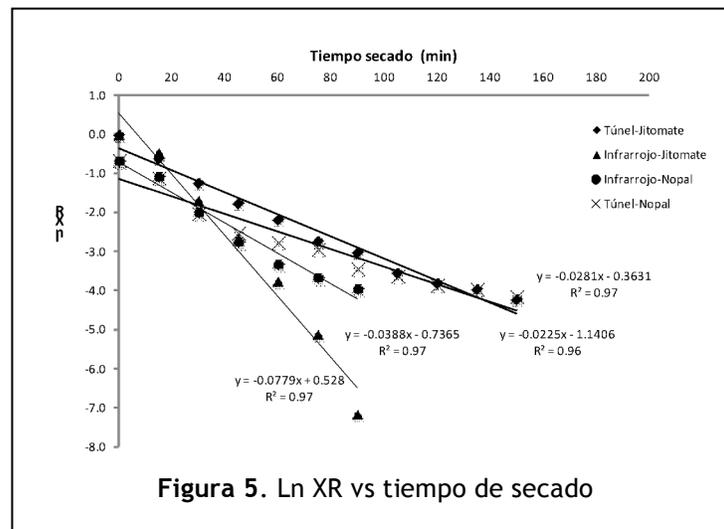
Tabla 2. Coeficiente de correlación y varianza explicada del ajuste de los datos a los modelos

Modelo	Secado por Infrarrojo Jitomate		Secado por Túnel Jitomate		Secado por Infrarrojo Nopal		Secado por Túnel Nopal	
	% Var.	R^2	% Var.	R^2	% Var.	R^2	% Var.	R^2
Newton	30.28	0.67	5.23	0.62	42.28	0.728	61.68	0.760
Page Modificado	86.82	0.93	64.30	0.89	79.00	0.896	27.71	0.874
logarítmico	99.95	0.99	55.00	0.69	99.99	0.99	98.88	0.986
Henderson and Pabis	99.898	0.999	97.660	0.986	99.313	0.991	94.569	0.954
Dos términos (Henderson)	99.898	0.999	97.660	0.986	99.313	0.991	94.569	0.954
Wang and Singh	29.099	0.312	11.339	0.259	44.760	0.533	31.504	0.673
Thompson	55.739	0.757	76.475	0.850	22.554	0.452	15.921	0.328
Aproximación de difusión	21.033	0.755	10.664	0.621	60.174	0.828	58.987	0.760
Midilli - Kucuk	99.946	0.999	98.454	0.986	99.964	0.999	97.983	0.975
Verma	99.841	0.999	97.674	0.986	99.271	0.991	94.206	0.954

La correlación entre los valores experimentales y los calculados (R^2) fue satisfactoria en la mayoría de modelos aplicados. Sin embargo, solamente el modelo de Midilli – Kucuk presentó valores de (R^2) mayores a 0.97 en todas las cinéticas, lo que indica un buen ajuste, confirmado por el porcentaje de varianza explicada (% Var), superior al 97%. Para periodos largos de deshidratación ($XR < 0,6$), la ecuación de difusión se puede simplificar a una serie con un solo término (Senadeera et al., 2003). Por lo tanto, suponiendo que la difusión es independiente del contenido de humedad, la ecuación de la segunda ley de Fick se puede reescribir como:

$$\ln XR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 Deff g}{4L^2}$$

Se determinó el coeficiente de difusión para cada experimento de secado representando gráficamente los datos experimentales en términos de $\ln XR$ frente al tiempo de secado (Fig. 5). Los valores del coeficiente de difusión del agua para las cinéticas de secado por infrarrojo y tipo túnel en Jitomate, fueron de 8.65×10^{-7} y $3.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, mientras que para el secado en Nopal, los valores fueron de 3.93×10^{-7} aplicando radiación infrarroja y $2.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ aplicando túnel de secado. Por lo tanto, la difusión del agua durante el secado de Jitomate y Nopal es mayor cuando se aplica el método de radiación infrarroja en comparación con el método convencional de secado por túnel. Los valores obtenidos del coeficiente de difusión del agua concuerdan con los obtenidos por Corrêa et al. (2012), durante el estudio del secado de tomate por métodos de radiación infrarroja



BIBLIOGRAFÍA

- Clemente G, Bon J, Sanjua'n N and Mulet A. 2011. Drying modelling of defrosted pork meat under forced convection conditions. *Meat Science* 88: 374–378.
- Corrêa, P. C., Horta de Oliveira, G. H., Baptestini, F. M., Diniz, M. D., and Almeida da Paixão, A. 2012. Tomato infrared drying: modeling and some coefficients of the dehydration process. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(2), 262-267.

- Martínez, S. G., Flores O. A., Mercado F. J., Orozco L. M. 2010. Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado, *Acta Universitaria*, 70 – 76.
- Martínez S, G., Mares Mares, E., Barrón García, S., Mercado Flores, J. 2009. Construcción y caracterización operacional de un equipo de radiación infrarroja., *RESPYN*, 48 – 56.
- Medina-Torres, L., Gallegos-Infante, J.A., Gonzalez-Laredob, R.F., Rocha-Guzman, N.E. 2008. Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus-indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *LWT - Food Science and Technology* 41, 1183–1188.
- Mcminn WAM. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwavevacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering* 72: 113–123.
- Ozdemir M and Devres YO. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering* 42: 225–233
- Ruiz Celma, A., Cuadros, F., López-Rodríguez, F. 2012. Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries. *Food and Bioproducts Processing* 90, (2), 224–234.
- Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., Rizvi, S.S.H. 2009. *Ingeniería en alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México: Limusa Wiley.
- Senadeera, W., B.R. Bhandari, G. Young, and B. Wijesinghe. 2003. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 58,277-283.
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F., and Bermúdez-Aguirre, D. 2005. Transport phenomena in food engineering: *Journal of Food Engineering* 67:113-128.