

DRYING KINETICS OF SLICES OF NOPAL (*Opuntia ficus indica*) CLADODES IN A CONVECTIVE TRANSVERSAL FLOW DRYER

CINÉTICA DE SECADO DE TIRAS DE CLADODIOS DE NOPAL (*Opuntia ficus indica*) EN UN SECADOR CONVECTIVO DE FLUJO TRANSVERSAL

Felipe Díaz-Ayala, G. del Socorro Álvarez-García*, Efraín Simá-Moo

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET-TecNM-SEP, Prolongación Avenida Palmira S/N, Colonia Palmira, 62490. Cuernavaca, Morelos, México.

ABSTRACT

Opuntia ficus-indica, also known as nopal, is a cactus which grows on arid and semiarid lands of America. Dehydrated nopal is an alternative for food preservation, but drying times of cladodes are very long. The objective of this study was to evaluate dry kinetics of nopal thin slices, of 4 mm thick, 140 mm long and 17 mm wide. We conducted the drying process in a convective cross flow tray dryer at 35 °C, 45 °C and 60 °C and air velocities of 1 m s⁻¹, 1.5 m s⁻¹ and 2 m s⁻¹, under laboratory conditions. Results indicated that the effect of air temperature on the drying time of nopal slices was higher than the air velocity ($p \leq 0.05$). The drying time for nopal in thin slices was remarkably lower (99 %) compared to that for whole cladode ($p \leq 0.05$ and 50 % lower for cylindrical 25 mm nopal pieces previously reported. Further, the experimental data of drying curve of nopal slices were fitted to different thin layer models and the Midilli model with empirical constants was the best describing the of nopal slices drying. ANOVA analysis indicated that all the tests were significant ($p \leq 0.05$) for all drying temperatures and velocities evaluated.

Keywords: Food drying, *nopal* cladode drying, drying kinetics of cactus, thin layer drying, drying time.

INTRODUCTION

Cacti belong to the genus *Opuntia* and they are native of northern desert zones of Mexico and south of USA. In Mexico, there are approximately 100 species among the 258 documented species (Guzmán *et al.*, 2007). For human consumption, only 10 to 12 species are used to produce fruit (pears) and vegetables (cactus). The

RESUMEN

Opuntia ficus-indica, también conocido como nopal, es un cactus que crece en zonas áridas y semiáridas de América. La deshidratación del nopal es una alternativa para su conservación como alimento pero el tiempo para secar los cladodios es muy largo. El objetivo de este estudio fue evaluar la cinética de secado de tiras delgadas, de 4 mm de grosor, 140 mm de longitud y 17 mm de anchura de nopal. El secado se realizó en un secador de charola con flujo convectivo cruzado a 35 °C, 45 °C y 60 °C y velocidades de aire de 1 m s⁻¹, 1.5 m s⁻¹ y 2 m s⁻¹, en condiciones de laboratorio. Los resultados mostraron que el efecto de la temperatura del aire en el tiempo de secado de las tiras de nopal fue mayor que la velocidad del aire ($p \leq 0.05$). El tiempo de secado de las tiras delgadas fue notablemente menor (99 %) en comparación con el del cladodio entero ($p \leq 0.05$) y 50 % menor que para piezas cilíndricas de nopal de 25 mm reportado previamente. Además, los datos experimentales de la curva de secado de las tiras de nopal se ajustaron a diferentes modelos de capa fina, y el modelo Midilli con constantes empíricas describió mejor el secado de nopal en rebanadas. El análisis estadístico ANDEVA indicó que todas las pruebas fueron significativas ($p \leq 0.05$) para todas las temperaturas de secado y velocidades evaluadas.

Palabras clave: Secado de alimentos, secado de cladodio de nopal, cinética de secado de cactus, secado de capa delgada, tiempo de secado.

INTRODUCCIÓN

Los cactus pertenecen al género *Opuntia* y son originarios de las zonas desérticas del norte de México y del sur de EE.UU. En México, hay aproximadamente 100 especies de las 258 documentadas (Guzmán *et al.*, 2007). Solamente de 10 a 12 especies se utilizan para consumo humano, por su

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: January 2015. Approved: July, 2015.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 49: 845-857. 2015.

Opuntia ficus-indica is also called *nopal*; the *nopal* cladode is well known for nutritional and healing qualities, it is rich in fiber, minerals, and vitamins (Maki-Díaz *et al.*, 2015). It is exported (85 % fresh) from Mexico. But the overabundance of fresh *nopal* in the market causes a price decrease and economic loss to producers FND, (2011).

Drying and grinding *nopal* cladodes are part of a preservation method used as an alternative to increase marketing opportunities, because cladodes shelf life can be extended and the high cost of transport and storage can be reduced (Erechukwu 1999; Midilli *et al.* 2002). A variety of dry fruits and vegetables with forced convection hot air were reported by Hossain and Bala (2002), Midilli *et al.* (2002), Kashaninejad and Tabil (2004), Doymaz (2006) and Waewsak *et al.* (2006), but few studies were found in the literature reviewed about cladode drying. Medina-Torrez *et al.* (2008) studied the effects of three drying methods (convective, osmotic and osmotic-convection) on the mechanical properties of the *nopal*. Higher elasticity was observed in the dried tissue using osmotic method showed than by convective hot air and it was harder than that osmotically dried; textural properties of *nopal* were strongly affected by combining drying processes this increasing brittle, and reducing cohesiveness and springiness. Authors recommended using convective drying to preserve the best mechanical characteristics of the *nopal*. They reported for a convective area of 0.0578 m² dry times of 11 to 18 h, at 65 and 45 °C for 3 and 5 m s⁻¹, to reach 2 % humidity, but they did not specify if the cactus cladode had been cut or if the cuticle was eliminated. Vasconcelos *et al.* (2012) studied osmotic dehydration of whole cladode considering binary and ternary solutions and found that temperature had a greater influence on water loss, the concentration of the osmotic solution (sucrose/NaCl/water) had a greater effect on *nopal* and the best conditions for osmotic dehydration were in a glucose solution at 40 °C. They did not account for the *nopal* drying time only for the study of effects of independent variables such as temperature and velocity on the drying process. López *et al.* (2009) used a convective dryer tunnel to study the kinetics of drying whole *nopal* cladodes with and without thorns at 35 °C, 45 °C and 60 °C and 1.5 m s⁻¹ and 3 m s⁻¹ air speed. They found that time to dry cladodes was very large; it ranged from 80 to 360 h for those with thorns and

producción de fruta (tunas) y verdura (cactus). La especie *Opuntia ficus indica* es conocida también como *nopal*; el cladodio del *nopal* es conocido por sus cualidades nutricionales y curativas, es rico en fibra, minerales y vitaminas (Maki-Díaz *et al.*, 2015). México exporta *nopal* (85 % fresco), pero su abundancia causa que el precio en el mercado baje y ocasionan pérdidas económicas a los productores. FND (2011).

El secado y molienda de los cladodios del *nopal* es un método de preservación utilizado para alargar su vida de anaquel, incrementar las oportunidades de comercialización y disminuir los costos altos de transporte y almacenamiento (Erechukwu, 1999; Midilli *et al.*, 2002). Una variedad de frutas y vegetales deshidratados con aire caliente por convección forzada fue documentada por Hossain and Bala (2002), Midilli *et al.* (2002), Kashaninejad y Tabil (2004), Doymaz (2006) y Waewsak *et al.* (2006), pero pocos estudios se encontraron en la literatura revisada acerca del secado de cladodios. Medina-Torrez *et al.* (2008) estudiaron los efectos de tres métodos de secado (convectivo, osmótico y convectivo-osmótico) en las propiedades mecánicas del *nopal*. Con el método osmótico se observó elasticidad mayor en el tejido seco que con el método con aire caliente por convección y con éste el tejido fue más fuerte que el secado osmóticamente; las propiedades de textura del *nopal* se afectaron fuertemente en el proceso combinado (osmótico-convectivo) pues aumentó la fragilidad y redujo la cohesividad y elasticidad. Los autores recomiendan utilizar el secado convectivo para conservar las características mecánicas mejores del *nopal*. Ellos reportaron para un área de convección de 0.0578 m² tiempos de secado de 11 a 18 h, a 65 y 45 °C para 3 y 5 m s⁻¹, para alcanzar 2 % de humedad, pero no especificaron si se rebanó el cladodio del cactus o si se eliminó la cutícula. Vasconcelos *et al.* (2012) estudiaron la deshidratación osmótica del cladodio completo considerando soluciones binarias y terciarias y observaron que la temperatura tuvo impacto mayor en la pérdida de agua, la concentración osmótica de la solución (sacarosa / NaCl / agua) tuvo efecto mayor en el *nopal* y las condiciones mejores para la deshidratación osmótica se tuvieron en la solución de glucosa a 40 °C. Ellos no consideraron el tiempo de secado del *nopal*, únicamente consideraron los efectos de las variables independientes, como la temperatura y la velocidad en el proceso de secado. López *et al.*, (2009) utilizaron un secador convectivo

from 50 to 260 h for those without thorns. However they did not investigate the slices of cladode drying kinetics. Touil *et al.* (2010) investigated the effect of three infrared dry temperatures (40, 50, 60 °C, not airflow) on *O. ficus indica* fruits and cladodes. Drying times of cladode, cut in small cylinders of 25 mm in diameter and 5 mm thick, ranged between 2.5 to 5.5 h. Therefore, the drying time is related to temperature, airflow, *nopal* geometry and the type of process used. Thus cutting the *nopal* cladode in small thin strips may diminish significantly the drying time, saving energy for drying.

The objective of this study was to evaluate: the drying kinetics of *nopal* cladode cut in thin slices of 17 mm width, 4 mm thick and 140 mm long, using a convective drier; the influence of the combined effects of varying air temperatures and velocities on the drying process; and ten kinetic models considering the combining effects of drying time, temperature, speed and relative humidity.

MATERIALS AND METHODS

Fresh *nopal* cladodes harvested during September-October 2008 in Tepoztlán, Morelos, Mexico, were used. They were selected according to maturity and geometric dimensions. The cladodes without thorns of 17 mm thick, 140 mm wide and 200 mm long were washed and cut in 10 thin slices of 4 mm thick, 17 mm width, and 140 mm long, approximately. The sample weight was 120 g. The initial moisture content (92.8 %) was determined in a laboratory oven (Imperial Laboratory Lab Oven Model 3478 M-line Instruments) according to AOAC (2000).

The experiments were carried out in a cross flow tray dryer designed and built at the Mechanical Engineering Department of Cenidet in Cuernavaca, Mexico (Figure 1). The dryer provided air at 35 °C, 45 °C and 60 °C and speed between 1.0, 1.5 and 2 m s⁻¹. Air was conducted by a centrifugal fan AXC 315B (Elicent) of 300 W and heated by five electric heaters of 600 W. Air temperature was controlled by a heating control unit (0.25 m wide, 0.25 m high and 0.9 m length) located at the entrance of the duct dryer. The test chamber was a transparent box (0.55 m and 0.60 m high) containing a stainless steel grid (0.25 m long and 0.25 m wide). Eleven LM-35 (±0.5 °C accuracy) sensors measured the ambient, interior, inlet and outlet air temperatures of the drying test chamber. Five HIH-4000-004 (Honeywell ±3.5 % accuracy) sensors measure exterior, interior, inlet and outlet air humidity of the test chamber.

A hot wire digital anemometer (Model 731A; BK Precision; ±3 % accuracy) measured the air velocity. A USB-6008

de tunel para estudiar la cinética de secado de los cladodios completos de nopal, con y sin espinas, a 35 °C, 45 °C y 60 °C y velocidad de aire de 1.5 m s⁻¹ y 3 m s⁻¹. Ellos observaron que el tiempo para secar los cladodios es muy largo; osciló de 80 a 360 h para los que tenían espinas y de 50 a 260 h para los que no las tenían. Sin embargo, ellos no investigaron la cinética de secado del nopal rebanado. No obstante, Touil *et al.* (2010) investigaron el efecto de tres temperaturas de secado por infrarrojo (40, 50, 60 °C, sin aire circulante) en frutas y cladodios de *O. ficus indica*. Los tiempos de secado del cladodio, seccionado en cilindros pequeños, de 25 mm de diámetro y 5 mm de grosor, oscilaron de 2.5 a 5.5 h. Así, el tiempo de secado está relacionado con la temperatura, el flujo de aire, la geometría del nopal y el proceso utilizado. De esta manera, las tiras pequeñas de cladodios de nopal pueden disminuir significativamente el tiempo de secado y, ahorrar energía para ello.

El objetivo de este estudio fue evaluar: la cinética de secado del cladodio del nopal cortado en tiras delgadas, de 17 mm de anchura, 4 mm de grosor y 140 mm de longitud, con un secador convectivo; la influencia del efecto combinado de variaciones de la temperatura y velocidad del aire en el proceso de secado; y diez modelos cinéticos que consideran los efectos combinados de secado, tiempo, temperatura, velocidad y humedad relativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cladodios frescos de nopal se cosecharon durante septiembre y octubre del 2008, en Tepoztlán, Morelos, México, y se seleccionaron de acuerdo con la madurez y a las dimensiones geométricas. Los cladodios sin espinas de 17 mm de grosor, 140 mm de anchura y 200 mm de longitud se lavaron y cortaron en 10 tiras delgadas de aproximadamente 4 mm de grosor, 17 mm de anchura, y 140 mm de longitud. El peso de la muestra fue de 120 g. El contenido inicial de humedad (92.8 %) se determinó en un horno (Imperial Laboratory Lab Oven Model 3478 M-line Instruments) en el laboratorio de acuerdo con AOAC (2000).

Los experimentos se realizaron en un deshidratador de flujo cruzado de charolas diseñado y construido en el Departamento de Ingeniería Mecánica CENIDET en Cuernavaca, México (Figura 1). El deshidratador proporcionó aire a 35 °C, 45 °C y 60 °C y velocidad entre 1.0, 1.5 y 2 m s⁻¹. El aire fue proporcionado por un ventilador centrífugo AXC 315B (Elicent) de 300 W y calentado por cinco calentadores eléctricos de 600 W. La temperatura del aire fue controlada por una unidad de calentamiento controlado

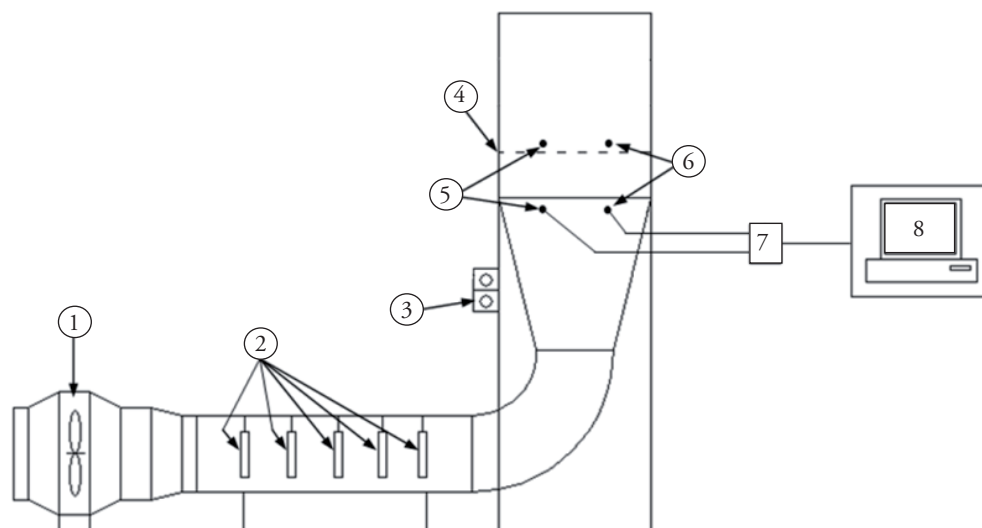


Figure 1. Diagram of the experimental tray dryer. 1. Centrifugal fan, 2. Heating element, 3. Velocity and temperature controllers, 4. Tray. 5. Temperature sensors. 6. Relative humidity sensors. 7. Acquisition data card. 8. PC.

Figura 1. Diagrama del secador experimental de charola. 1. Ventilador centrífugo, 2. Elemento de calefacción, 3. Controladores de velocidad y temperatura, 4. Charola. 5. Sensores de temperatura. 6. Sensores de humedad relativa. 7. Tarjeta de adquisición de Datos. 8. PC.

(National Instruments) acquisition system was used to gather and process the data. A J-100 (Reyo) digital scale (± 0.01 g accuracy) monitored the weight of *nopal* slices.

After the experimental data were obtained a suitable theoretical model that describes the drying curve of thin *nopal* slices was selected. Thus the experimental drying curves were fitted by 10 different thin layer models (Table 1).

Experimental procedure

Nopal sample of 10 thin slices, 4 mm thick, 140 mm long and 17 mm wide, was extended on the grid tray (Figure 2). Air temperature and speed were set on the convective dryer. The drying temperature and relative humidity of air at the duct entrance, upper and lower tray and exit were measured and recorded. The samples were weighted manually every 10 min throughout the experiment. The ambient temperature and air relative humidity in the room ranged from 24.9 to 27.5 °C and from 39.9 to 59.6 %. The initial moisture content of the *nopal* slices ranged from 0.943 to 0.953 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{dry-matter}}$ and the final *nopal* moisture content needed to grind the slices should be 0.02 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{dry-matter}}$.

RESULTS AND DISCUSSION

In order to determine the variability among the experiments, three experiments were performed

(0.25 m de anchura, 0.25 m altura y 0.9 m de longitud) localizado a la entrada del secador. La cámara de pruebas fue una caja transparente (0.55 m y 0.60 m de altura) que contenía una malla de acero inoxidable (0.25 m de longitud y 0.25 m de anchura). Once sensores LM-35 (exactitud ± 0.5 °C) midieron la temperatura ambiente, interior, de entrada y de salida de aire de la cámara de prueba de secado. Cinco sensores HIH-4000-004 (Honeywell exactitud ± 3.5 %) midieron la humedad del aire exterior, interior, de entrada y salida de la cámara de pruebas.

Un anemómetro digital de alambre caliente (Modelo 731A; BK Precisión; exactitud ± 3 %) midió la velocidad del aire. Un sistema de adquisición USB (National Instruments) se usó para recopilar y procesar los datos. Una escala digital J-100 (Reyo) (exactitud ± 0.01 g) monitoreó el peso de las tiras de *nopal*.

Después que los datos experimentales se obtuvieron se seleccionó un modelo teórico adecuado que describe la curva de secado de las tiras delgadas de *nopal*. Así, las curvas de secado experimentales se ajustaron a 10 modelos diferentes de capa delgada (Cuadro 1).

Procedimiento experimental

La muestra de 10 tiras delgadas de *nopal*, de 4 mm de grosor, 140 mm de longitud y 17 mm de anchura, fue extendida en la charola con malla (Figura 2). La temperatura y velocidad del aire se establecieron en el secador convectivo. La temperatura de secado y la humedad relativa del aire en el ducto de entrada,

Table 1. Thin layer models.
Cuadro 1. Modelos de capa delgada.

No.	Model name	Model equation	Reference
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Westerman <i>et al.</i> , 1973
2	Henderson and Pabis	$MR = \alpha \exp(-kt)$	Yagcioglu <i>et al.</i> , 1999
3	Modified Page I	$MR = \exp[-(kt)^n]$	White <i>et al.</i> , 1981
4	TwoTerm	$MR = \alpha \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Rahman <i>et al.</i> , 1998
5	Two Term Exponential	$MR = \alpha \exp(-kt) + (1-\alpha) \exp(-kat)$	Yaldiz <i>et al.</i> , 2001
6	Modified Page II	$MR = \exp(-kt)^n$	Midilli <i>et al.</i> , 2002
7	Simplified Fick's diffusion	$MR = \exp\left[-k\left(\frac{t}{L^2}\right)\right]$	Diamante and Munro, 1991
8	Diffusion Approximation	$MR = \alpha \exp(-kt) + (1-\alpha) \exp(-kbt)$	Yaldiz and Ertekin, 2001
9	Modified Herderson and Pabis	$MR = \alpha \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-nt)$	Karathanos, 1999
10	Midilli	$MR = \alpha \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> , 2002

where: MR is the moisture ratio (dimensionless), M is the moisture content ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{dry}}$) a, b, c, n, g, h, L are constants (dimensionless), k, k_0, k_1 are drying rate constants (h^{-1}) and t is the drying time (h) ♦ donde: MR es la tasa de humedad (adimensional); M_i es el contenido de humedad inicial ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{seco}}$); M es el contenido de humedad ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{seco}}$); M_e es el contenido de humedad de equilibrio; a, b, c, n, g, h, L son constantes (adimensionales), k, k_0, k_1 son constantes de la velocidad de secado las (h^{-1}) y t es el tiempo de secado (h).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e}, MR = \frac{M}{M_i} \quad (1)$$

The effects of air temperature, air velocity and relative humidity of the drying air were incorporated in the Arrhenius equation ♦ Los efectos de la temperatura del aire, la velocidad del aire y la humedad relativa del aire de secado se incorporaron en la ecuación de Arrhenius:

$$\text{Drying constan} = \alpha_o v^{a_1} HR^{\alpha_2} \exp\left(\frac{-\alpha_3}{T_{abs}}\right) \quad (2)$$

where: $\alpha_o, \alpha_1, \alpha_2$ and α_3 are empirical constants; v, HR and T_{abs} are air speed (m s^{-1}), relative humidity (%) and absolute temperature ($^{\circ}\text{C}$) respectively ♦ donde: $\alpha_o, \alpha_1, \alpha_2$, y α_3 son constantes empíricas; v, HR y T_{abs} son la velocidad del aire (m s^{-1}), humedad relativa (%) y temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$), respectivamente.

for every condition of velocity and temperature. The data of the three experiments were analyzed by computing the average standard deviation. The average standard deviation of these experiments, for all the conditions of velocity and temperature, was 0.024. The maximum standard deviation was 0.032, which happen when the humidity of the product was higher than 60 % and the minimum standard deviation of 0.007 was when the humidity of the product was 4%.

Drying times of 4.78, 3.00, 1.68 h, for 1 m s^{-1} ; 3.8, 2.91, 1.53 h for 1.5 m s^{-1} and 2.99, 2.31 and 1.25 h for 2 m s^{-1} , respectively (Figure 3). For the highest temperature and velocity the drying time was 1.25 h, which was 40 % lower than the drying time

arriba y abajo de la charola y a la salida se midieron y registraron. Las muestras se pesaron manualmente cada 10 min a lo largo del experimento. La temperatura ambiente y la humedad relativa del aire en la habitación oscilo de 24.9 a $27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y de 39.9 a 59.6% . El contenido de humedad inicial de las tiras de nopal fluctuó de 0.943 a $0.953 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{materia seca}}$ y el contenido final de humedad del nopal necesario para triturar las tiras debe ser $0.02 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{seco}}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar la variabilidad entre los experimentos, tres de ellos se realizaron para cada condición de velocidad y temperatura. Los datos de los tres experimentos fueron analizados mediante el cálculo

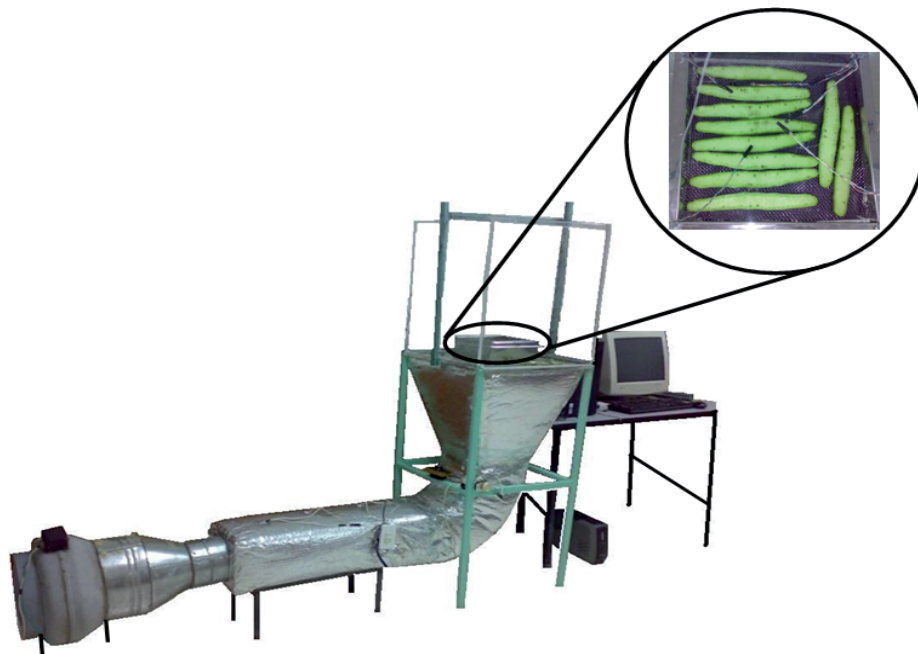


Figure 2. Experimental setup and the nopal cladode slices.
Figura 2. Arreglo experimental y tiras de cladodios de nopal.

for high velocity and lower temperature (2.99 h). Besides the drying constant period was absent, which means that the drying process was carried out only in the falling rate period, indicating that diffusion is the mechanism governing the motion of the moisture migration in *nopal* slices. This result agrees with that reported by Touil *et al.* (2010).

A comparison (Figure 4) between the convective drying times of cladode slices, of the present work, and the whole *nopal* cladode with and without thorns at 45 °C and speed of 1.5 m s⁻¹ reported by Lopez *et al.* (2009) indicated that time to dry slices was substantially lower, 1.25 h against 50 h of Lopez *et al.* (2009), even when *nopal* cuticle was reduced by 30 %. Comparing the drying time of cylinders of *nopal*, reported by Touil *et al.* (2010), against the drying time of thin strips of 4 mm thick, 140 mm long and 17 mm width was also very low; 1.25 h against 2.5 h. The difference is that they considered 25 mm diameter cylinder and we considered strips of 4 mm thick. It is worth to mention, that drying cladode in thin strips remarkably decreased the drying time compared to the drying time of whole cladodes with or without thorn and cylinders of

de la desviación estándar promedio. La desviación estándar promedio de estos experimentos, para todas las condiciones de velocidad y temperatura, fue 0.024. La desviación estándar máxima fue 0.032, esta ocurre cuando la humedad del producto fue mayor que 60 % y la desviación estándar mínima de 0.007 cuando la humedad del producto fue 4 %. Los tiempos de secado fueron 4.78, 3.00, 1.68 h, para 1 m s⁻¹; 3.8, 2.91, 1.53 h para 1.5 m s⁻¹ y 2.99, 2.31 y 1.25 h para 2 m s⁻¹, respectivamente (Figura 3). Para la temperatura mayor y la velocidad más altas el tiempo de secado fue de 1.25 h, que fue 40 % menor que el tiempo de secado para la velocidad alta y temperatura menor (2.99 h). Además el periodo constante de secado estuvo ausente, lo que significa que el proceso de secado se llevó a cabo sólo en el período de tasa decreciente, lo cual indica que la difusión es el mecanismo que regula el movimiento de la migración de la humedad en las tiras de nopal. Este resultado coincide con lo documentado por Touil *et al.* (2010).

Una comparación (Figura 4) entre los tiempos de secado convectivo de las tiras de los cladodios, del presente estudio y el del cladodio entero del nopal con y sin espinas a 45 °C y velocidad de 1.5 m

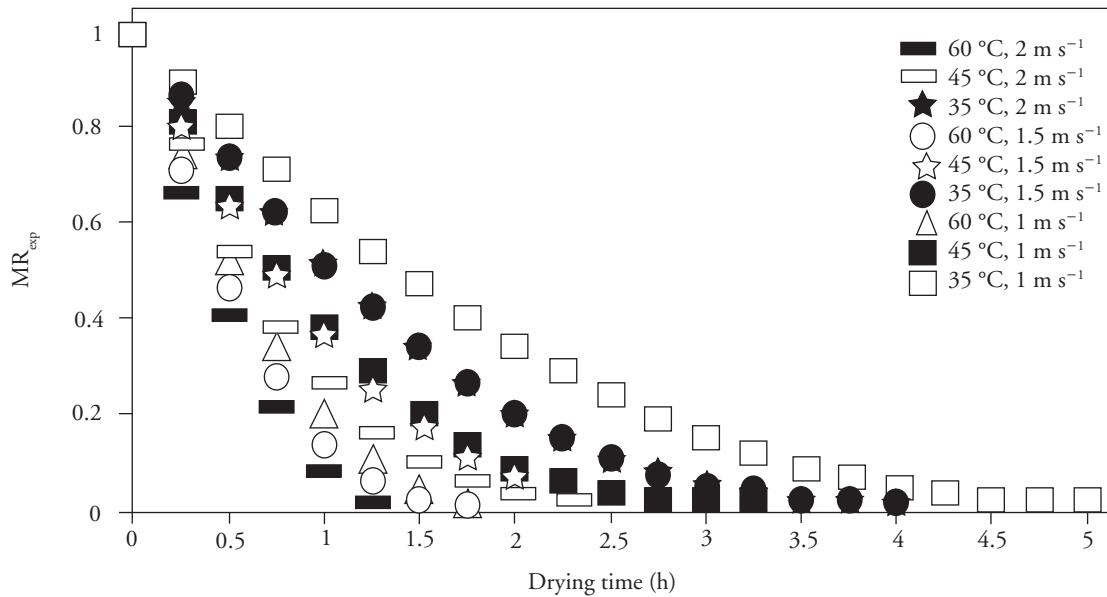


Figure 3. Drying curves for different air velocities and temperatures conditions.

Figura 3. Curvas de secado para diferentes condiciones de velocidades de aire y temperaturas.

25 mm diameter (99 % and 50 %). It seems that geometry and thickness are important to reduce the drying time of *nopal*.

The drying rate continuously decreased as the moisture ratio drop (Figure 5). Some overlapping drying rate curves seems that air velocity for these conditions has no effect on the drying kinetics.

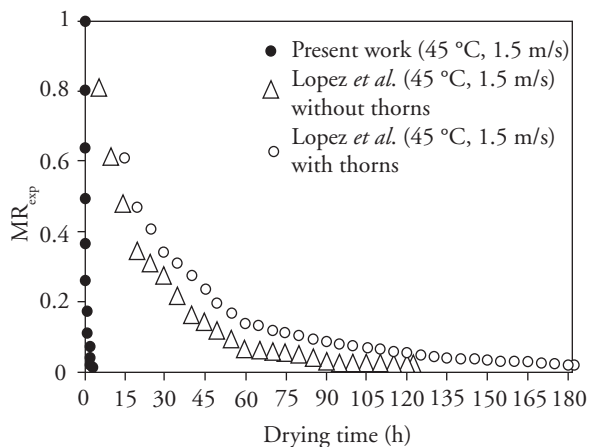


Figure 4. Drying times of *nopal* cladode in thin slices and *nopal* cladode with and without thorns.

Figura 4. Tiempos de secado de cladodios de *nopal* en tiras delgadas y cladodios de *nopal* con y sin espinas.

s^{-1} , reportado por Lopez *et al.* (2009), indicó que el tiempo para secar las tiras fue sustancialmente menor, 1.25 h en comparación con 50 h de López *et al.* (2009), incluso cuando la cutícula del *nopal* se redujo en 30 %. Al comparar el tiempo de secado de cilindros de *nopal* reportado por Touil *et al.* (2010) con el tiempo de secado de las tiras delgadas de 4 mm de grosor, 140 mm de longitud y 17 mm de anchura, se vio que también fue muy bajo: 1.25 h contra 2.5 h. La diferencia es que ellos consideraron cilindros 25 mm de diámetros y nosotros tiras de 4 mm de grosor. Es importante mencionar que el secado del cladodio en tiras delgadas disminuyó notablemente el tiempo de secado en comparación con el cladodio completo con y sin espinas y cilindros de 25 mm de diámetro (99 % y 50 %). Parece que la geometría y el grosor son importantes para reducir el tiempo de secado de *nopal*.

La velocidad de secado disminuye continuamente a medida que la relación de humedad disminuyó (Figura 5). Algunas curvas de velocidad de secado que se sobrelaparon muestran que la velocidad de aire para estas condiciones no tiene efecto sobre la cinética de secado.

El tiempo de secado a 60 °C disminuyó significativamente (1.75 h) en comparación con 35 °C (3.5 h) (Figura 6). El tiempo de secado fue casi el mismo (3 h)

The drying time at 60 °C decreased significantly (1.75 h) compared to 35 °C (3.5 h) (Figure 6). The drying time was almost the same (3 h) at 1 m s⁻¹ than 1.5 m s⁻¹ and decreases slightly (2.75 h) at 2 m s⁻¹ (Figure 7). As it can be seen, the effect of air temperature was a more significant parameter compared with air velocity.

Thin layer model

The most suitable theoretical model selected among the 10 thin layer models (Table 1) was found fitting the drying curves of experimental data (Figure 3). In order to determine the best model that describes the experimental data of sliced *nopal* cladode, statistical parameters (Panchariya *et al.*, 2002; Ghazanfari *et al.*, 2006) such as correlation coefficient (equation 3), reduced chi-square (equation 4) and root mean square error (equation 5) were calculated by:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N MR_{exp} * \sum_{i=1}^N MR_{pred} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N MR_{exp} \right]^2 * \left[\sum_{i=1}^N MR_{pred} \right]^2} \quad (3)$$

a 1 m s⁻¹ que a 1.5 m s⁻¹ y disminuyó ligeramente (2.75 h) a 2 m s⁻¹ (Figura 7). Como se ve, el efecto de la temperatura del aire fue un parámetro más significativo en comparación con la velocidad del aire.

Modelo de capa delgada

El modelo teórico más adecuado entre los 10 modelos de capa delgada (Cuadro 1) se encontró ajustando las curvas de secado de los datos experimentales (Figura 3). Con el fin de determinar el modelo que mejor describe los datos experimentales de las tiras de los cladodios nopal, los parámetros estadísticos (Panchariya *et al.*, 2002; Ghazanfari *et al.*, 2006) como coeficiente de correlación (Figura 3), reducción de ji-cuadrada (ecuación 4) y raíz del cuadrado medio del error (ecuación 5) se calcularon por:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N MR_{exp} * \sum_{i=1}^N MR_{pred} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N MR_{exp} \right]^2 * \left[\sum_{i=1}^N MR_{pred} \right]^2} \quad (3)$$

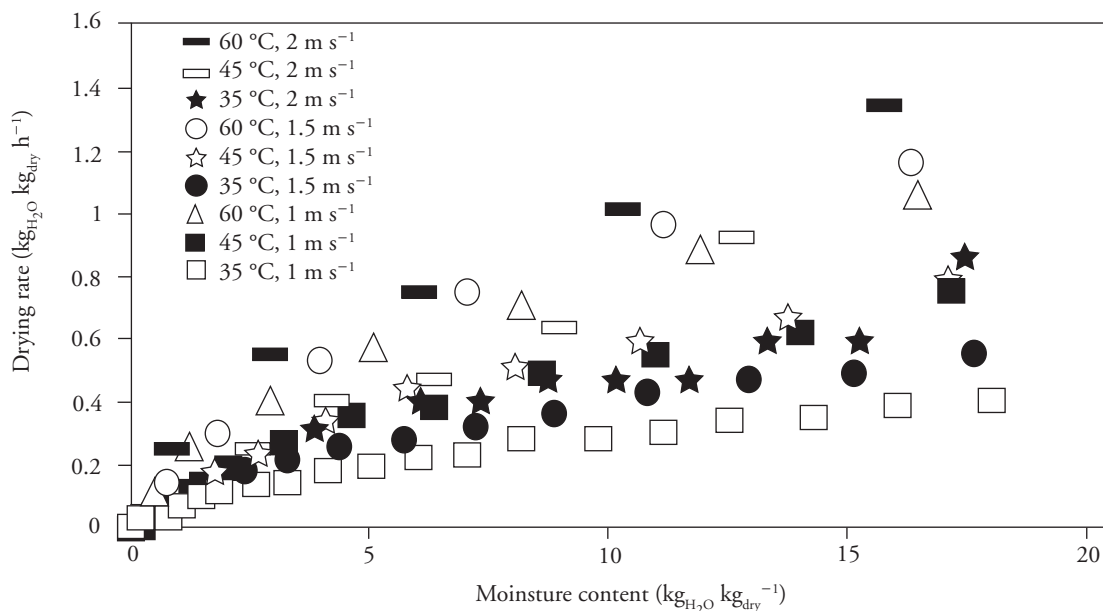


Figure 5. Drying rate as a function of the moisture content of *nopal* slices for different air velocities and air temperature conditions.
Figura 5. Velocidad de secado en función del contenido de humedad de tiras de nopal a velocidades de aire y condiciones de temperatura diferentes.

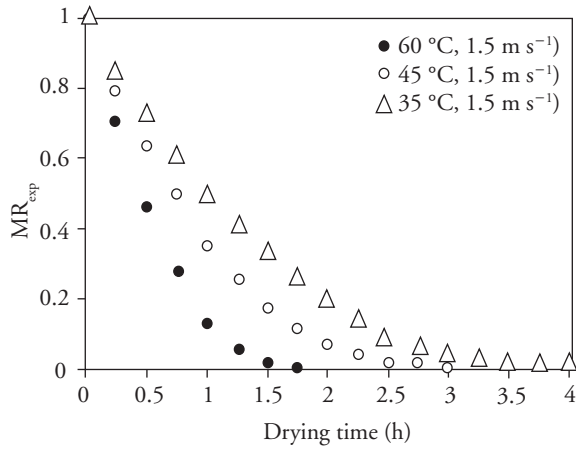


Figure 6. Effect of the air temperature on the drying of *nopal* slices, air at 1.5 m s⁻¹ and 35 °C, 45 °C and 60 °C.
Figura 6. Efecto de la temperatura del aire en el secado de tiras de nopal, aire a 1.5 m s⁻¹ y 35 °C, 45 °C y 60 °C.

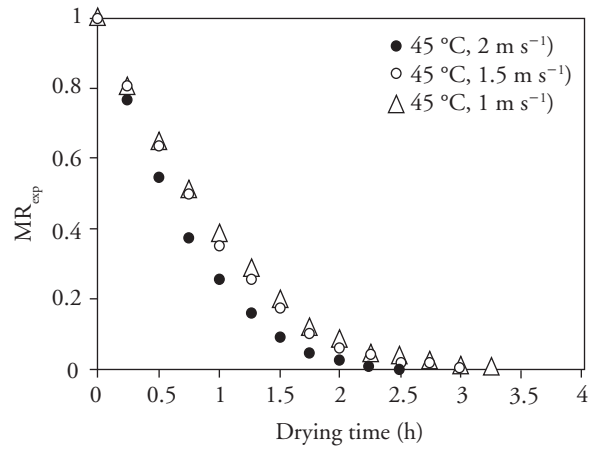


Figure 7. Effect of the air velocity on the drying of *nopal* slices at 45 °C and air velocities of 1 m s⁻¹, 1.5 m s⁻¹ and 2 m s⁻¹.
Figura 7. Efecto de la velocidad del aire en el secado de tiras de nopal a 45 °C para velocidades del aire de 1 m s⁻¹, 1.5 m s⁻¹ y 2 m s⁻¹.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pred})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

where R^2 is the correlation coefficient, MR_{exp} is the experimental humidity relationship, MR_{pred} is the moisture content calculated, χ^2 is the Chi-square, N is the data number, z is the number of constants of the model, and $RMSE$ is the root mean square error. The calculated empirical constants for different conditions of air velocities and temperatures of the 10 equation models are shown in Table 2. The coefficient of determination (R^2), coefficient chi-square (χ^2) and root mean square error ($RMSE$) were calculated. R^2 was in the range of 0.983-0.999, χ^2 was in the range of 4.694×10^{-5} - 6.691×10^{-3} and $RMSE$ was between 6.378×10^{-3} - 4.417×10^{-2} (Table 3).

From the Arrhenius equation (equation 2), the four empirical constants for the fitted model equation for *nopal* cladode slices were:

$$a = 0.929v^{0.001}HR^{-0.009}\exp\left(\frac{13.725}{T_{abs}}\right) \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pred})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

donde R^2 es el coeficiente de correlación, MR_{exp} es la relación experimental de humedad, MR_{pred} es el contenido de humedad calculado, χ^2 es Ji-cuadrada, N es el número de datos, z es el número de constantes en el modelo, y $RMSE$ es la raíz del cuadrado medio del error. Las constantes empíricas calculadas para diferentes condiciones de velocidades de aire y temperaturas de las ecuaciones de los 10 modelos se muestran en el Cuadro 2. El coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de chi-cuadrada (χ^2) y la raíz del cuadrado medio del error ($RMSE$) se calcularon. R^2 estuvo entre 0.983 y 0.999, χ^2 estuvo en el intervalo de 4.694×10^{-5} y 6.691×10^{-3} y $RMSE$ estuvo entre 6.378×10^{-3} y 4.417×10^{-2} (Cuadro 3).

A partir de la ecuación de Arrhenius (ecuación 2), las cuatro constantes empíricas de la ecuación del modelo ajustado para las tiras de cladodios de nopal fueron:

Table 2. Constants for the nonlinear models for different air speed and temperature.

Cuadro 2. Constantes de los modelos no lineales de velocidad y temperatura diferentes del aire.

Model no.	Constant	1 m s ⁻¹			1.5 m s ⁻¹			2 m s ⁻¹		
		35 °C	45 °C	60 °C	35 °C	45 °C	60 °C	35 °C	45 °C	60 °C
1	<i>k</i>	0.571	1.022	1.550	0.768	1.081	1.769	0.969	1.355	2.017
2	<i>a</i>	1.063	1.046	1.041	1.056	1.045	1.038	1.038	1.040	1.032
	<i>k</i>	0.604	1.064	1.601	0.808	1.125	1.826	1.003	1.403	2.071
3	<i>k</i>	0.548	0.982	1.472	0.739	1.038	1.680	0.934	1.305	1.907
	<i>n</i>	1.265	1.236	1.307	1.255	1.244	1.311	1.219	1.220	1.317
	<i>a</i>	78.679	96.572	82.306	93.060	89.392	88.771	72.388	83.569	93.431
4	<i>k₀</i>	0.303	0.617	0.766	0.433	0.648	0.986	0.519	0.933	1.077
	<i>b</i>	-77.657	-95.551	-81.291	-92.035	-88.370	-87.753	-71.381	-82.542	-92.418
	<i>k₁</i>	0.301	0.614	0.759	0.431	0.644	0.980	0.515	0.929	1.069
5	<i>a</i>	1.799	1.774	1.840	1.793	1.782	1.856	1.739	1.771	1.853
	<i>k</i>	0.793	1.398	2.185	1.064	1.485	2.515	1.302	1.851	2.854
6	<i>k</i>	3.241	5.264	5.887	3.016	5.586	3.721	3.826	7.018	8.018
	<i>n</i>	0.176	0.194	0.263	0.255	0.193	0.475	0.253	0.193	0.252
	<i>k</i>	0.586	0.716	0.571	0.482	0.305	1.581	0.124	2.475	1.074
7	<i>L</i>	1.094	0.881	0.665	0.870	0.609	0.919	0.439	1.269	0.744
	<i>n</i>	1.265	1.236	1.307	1.255	1.244	1.311	1.219	1.220	1.317
	<i>a</i>	-40.786	-43.732	-57.928	-35.626	-45.057	-44.099	-37.319	-29.774	-55.423
8	<i>k</i>	1.005	1.757	2.787	1.347	1.871	3.216	1.630	2.319	3.642
	<i>b</i>	0.983	0.985	0.987	0.981	0.985	0.983	0.984	0.979	0.987
	<i>a</i>	0.392	0.378	0.347	0.390	0.349	0.381	0.316	0.314	0.411
	<i>k</i>	0.604	1.064	1.601	0.808	1.125	1.826	1.003	1.403	2.071
9	<i>b</i>	0.376	0.307	0.347	0.390	0.349	0.381	0.316	0.314	0.411
	<i>g</i>	0.604	1.064	1.601	0.808	1.125	1.826	1.003	1.403	2.071
	<i>c</i>	0.295	0.361	0.347	0.277	0.347	0.277	0.406	0.413	0.211
	<i>h</i>	0.604	1.064	1.601	0.808	1.125	1.826	1.003	1.403	2.071
	<i>a</i>	0.984	0.989	0.996	0.987	0.989	0.996	0.987	0.998	0.996
10	<i>k</i>	0.448	0.956	1.515	0.660	1.026	1.901	0.866	1.391	2.178
	<i>n</i>	1.231	1.239	1.228	1.240	1.250	1.282	1.168	1.233	1.263
	<i>b</i>	0.006	-0.002	-0.019	-0.004	-0.002	-0.007	-0.011	-0.001	0.014

The models 2, 4, 8 and 10 fit best the experimental data (Table 3) and the average of statistical parameters was: $R^2=0.999$, $x^2=2.169 \times 10^{-4}$ and $RMSE=1.293 \times 10^{-2}$ for the models 2, 4 and 8 and $R^2=0.999$, $x^2=0.174 \times 10^{-3}$ and $RMSE=1.042 \times 10^{-2}$ for model 10. Due to the small variations of the statistical parameters, the coefficient of variability was calculated. Models 2, 4 and 8 had a variability coefficient of 5.51 %, but the variability coefficient of model 10 was 3.76 %. Therefore, the model equation of Midilli (ecuación 10) represented the best model for the thin layer drying of 4 mm thick nopal slices ♦ Los modelos 2, 4, 8 y 10 son los que mejor se ajustaron a los datos experimentales (Cuadro 3) y el promedio de los parámetros estadísticos para los modelos 2, 4 y 8 fue: $R^2=0.999$, $x^2=2.169 \times 10^{-4}$ y $RMSE=1.293 \times 10^{-2}$ y para el modelo 10 fue $R^2=0.999$, $x^2=0.174 \times 10^{-3}$ y $RMSE=1.042 \times 10^{-2}$. Debido a las variaciones pequeñas de los parámetros estadísticos, se calculó el coeficiente de variabilidad. Modelos 2, 4 y 8 tuvieron un coeficiente de variabilidad de 5.51 %, pero el coeficiente de variabilidad de modelo 10 fue 3.76 %. Por lo tanto, la ecuación del modelo de Midilli (Ecuación 10) representó el modelo mejor para el secado de capa delgada de tiras de nopal de 4 mm de grosor.

$$b = -1533472.577v^{-1.322}HR^{0.467} \exp\left(\frac{5830.86513.725}{Tabs}\right) \quad (7)$$

$$a = 0.929v^{0.001}HR^{-0.009} \exp\left(\frac{13.725}{Tabs}\right) \quad (6)$$

Table 3. Average statistical parameters and the variability coefficient of the models.

Cuadro 3. Parámetros estadísticos promedio y coeficiente de variabilidad de los modelos.

Model no.	R ²	x ² (x10 ⁻³)	RMSE (x10 ⁻²)	Variability (%)
1	0.987	1.545	3.725	4.11
2	0.989	1.546	3.495	4.77
3	0.999	0.217	1.293	5.51
4	0.997	0.452	1.691	3.36
5	0.998	0.293	1.497	5.87
6	0.9866	1.708	3.725	4.11
7	0.9986	0.244	1.293	5.51
8	0.998	0.261	1.326	8.50
9	0.989	2.827	3.398	4.77
10	0.999	0.174	1.042	3.76

$$k = 151.964v^{0.776}HR^{-0.336}\exp\left(\frac{1871.599}{T_{abs}}\right) \quad (8)$$

$$n = 0.204v^{0.054}HR^{-0.113}\exp\left(\frac{496.777}{T_{abs}}\right) \quad (9)$$

where HR is the air relative humidity, v is the air velocity and T_{abs} is the air drying temperature.

A good agreement between experimental data and drying model curves for air at 35 °C, 45 °C y 60 °C and air speeds of (a) 2 m s⁻¹, (b) 1.5 m s⁻¹ and (c) 1 m s⁻¹ were obtained (Figure 8).

The p-values obtained with the ANOVA analysis were lower than 0.05 for all drying temperatures and velocities used (Table 4).

CONCLUSIONS

The drying time for 4 mm thick *nopal* slices is remarkably lower than the drying time of the complete cladode (99 %) reported by Lopez *et al.* (2009). The drying time of cylinder of cladodes reported by Touil *et al.* (2010) is also high (50 %) than those in rectangular slices of 4mm thick. The difference is the cylindrical geometry, 25 mm diameter in that study and 4 mm thick slices, of cross

$$b = -1533472.577v^{-1.322}HR^{0.467}\exp\left(\frac{5830.86513.725}{T_{abs}}\right) \quad (7)$$

$$k = 151.964v^{0.776}HR^{-0.336}\exp\left(\frac{1871.599}{T_{abs}}\right) \quad (8)$$

$$n = 0.204v^{0.054}HR^{-0.113}\exp\left(\frac{496.777}{T_{abs}}\right) \quad (9)$$

donde: HR es la humedad relativa del aire, v es velocidad del aire y T_{abs} es la temperatura absoluta del aire de secado.

Una concordancia buena se obtuvo entre los datos experimentales y la curva del modelo de secado con aire a 35 °C, 45 °C y 60 °C y velocidades de aire de (a) 2 m s⁻¹, (b) 1.5 m s⁻¹ y (c) 1 m s⁻¹ (Figura 8).

Los valores de p obtenidos con el ANDEVA fueron menores a 0.05 para todas las temperaturas y velocidades de secado utilizadas (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

El tiempo de secado para las tiras de nopal de 4 mm de grosor es notablemente mayor que el tiempo de secado del cladodio completo (99 %) documentado por López *et al.* (2009). El tiempo de secado de cilindros de cladodios documentado por Touil *et al.* (2010) también es mayor (50 %) que aquel para tiras rectangulares de 4 mm de grosor. La diferencia es la geometría del cilindro, 25 mm de diámetro en ese estudio y tiras de 4 mm de grosor, área de 23.8 cm² de sección transversal en el estudio presente. También la curva de secado mostró que el período de secado de velocidad constante está ausente, por lo que sólo el período de velocidad de secado decreciente está presente. Los efectos combinados de diferentes temperaturas y velocidades en el tiempo de secado mostraron que la temperatura del aire fue más importante que la velocidad del aire de secado. La variabilidad de los experimentos mostró un promedio de la desviación estándar de 0.025. La ecuación ajustada mostró que el modelo Midilly fue el mejor para la capa delgada

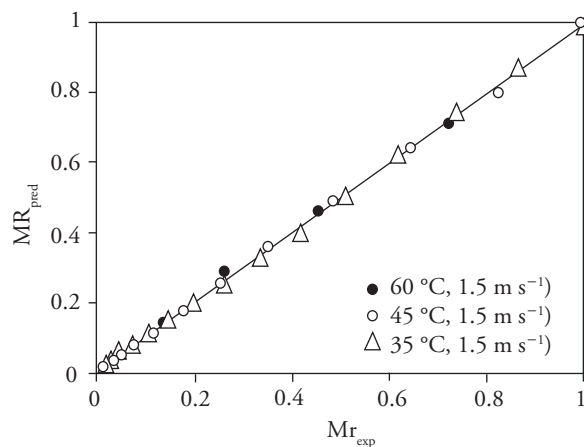
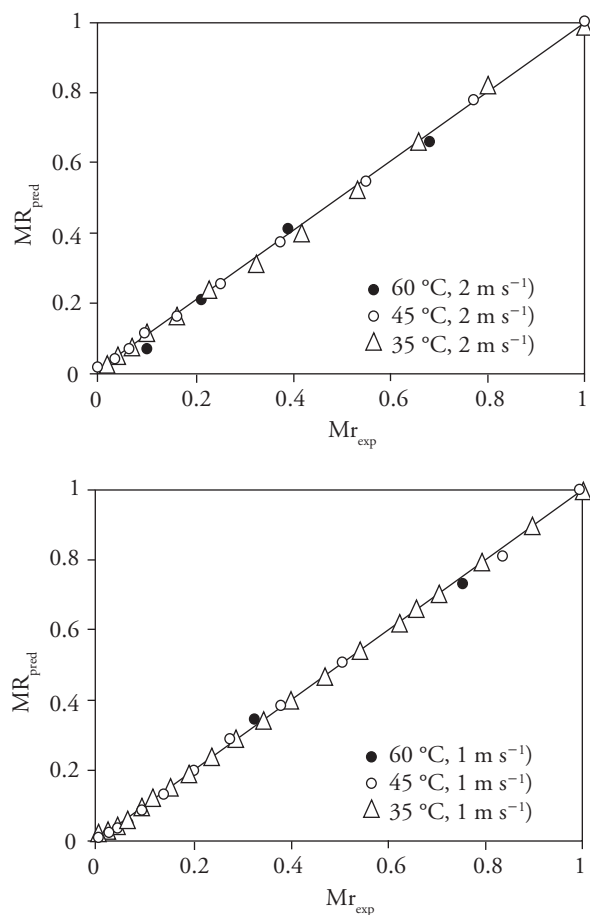


Figure 8. Comparison between the experimental moisture content curve and fitted models for air at 35 °C, 45 °C y 60 °C and air speeds of (a) 2 m s⁻¹, (b) 1.5 m s⁻¹ y (c) 1 m s⁻¹.

Figura 8. Comparación entre la curva de contenido de humedad experimental y modelos ajustados para temperatura del aire de 35 °C, 45 °C y 60 °C y velocidades del aire de (a) 2 m s⁻¹, (b) de 1.5 m s⁻¹ y (c) 1 m s⁻¹.

sectional area of 23.8 cm², in the present study. Also the drying curve showed that the constant rate period of drying is absent, so only the falling drying rate period is present. The combined effects of different temperatures and velocities on the drying time showed that air temperature was more important than the drying air velocity. The variability of experiments showed an average of standard deviation of 0.025. The fitted equation showed that the Midilli model was the best model for the thin layer of 4 mm thick *nopal* slices with empirical constants presented here.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for the support given to this project and to Dr. R. Díaz-Acosta (National Institute of Public Health, Biostatistical Department, Mexico) for sharing his experience for the regression analysis of the experimental data.

de 4 mm de grosor de las tiras de nopal con constantes empíricas que se presentaran aquí.

—Fin de la versión en Español—

-----*

Table 4. ANOVA analysis of the data for Midilli model ($p \leq 0.05$).

Cuadro 4. Análisis ANDEVA de los datos del modelo Midilli ($p \leq 0.05$).

v (m s ⁻¹)	T (°C)	p	R ²
1	35	7.987 x10 ⁻²⁶	0.999
	45	7.797 x10 ⁻¹⁵	0.999
	60	5.912 x10 ⁻⁵	0.999
1.5	35	1.261 x10 ⁻¹⁹	0.999
	45	2.540 x10 ⁻¹³	0.999
	60	4.474 x10 ⁻⁵	0.999
2	35	6.430 x10 ⁻¹¹	0.998
	45	3.059 x10 ⁻¹⁰	1.000
	60	2.938 x10 ⁻³	0.999

LITERATURE CITED

- AOAC, Association of Official Analytical Chemists. 2000. Official Methods of Analysis. No. 934.06 (17th ed.). International, Maryland.
- Diamante, L. M., and P. A. Munro. 1991. Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *Int. J. Food Sci. Technol.* 26: 99-109.
- Doymaz, I. 2006. Thin-layer drying behavior of mint leaves. *J. Food Eng.* 74: 370-375.
- Erechukwu, O. V. 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energ. Convers. Manage.* 40: 593-613.
- FND. 2011. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero. Monografía del Nopal y la Tuna. <http://www.financiararural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/MonografiaNopal-Tuna%28jul11%29.pdf> (Accessed: May 2015).
- Ghazanfari, A. S., L. G. Emami, S. Tabil, and Panigrahi. 2006. Thin-layer drying of flax fiber: II. modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Dry. Technol.* 24: 1637-1642.
- Guzmán, U., S. Arias, and P. Dávila. 2007. Catálogo de Cactáceas Mexicanas. Editorial: UNAM. Ciudad Universitaria México D. F. 320 p.
- Hossain, M. A., and B. K. Bala. 2002. Thin-layer drying characteristics for green chilli. *Dry. Technol.* 20: 489-505.
- Karathanos, V. T., and V. G. Belessiotis. 1999. Application of a thin layer equation to drying data fresh and semi-dried fruits. *J. Agr. Eng. Res.* 74: 355-361.
- Kashaninejad, M., and L. G. Tabil. 2004. Drying characteristics of purslane (portulaca oleraceae L.). *Dry. Technol.* 22: 2183-2200.
- López, R., A. de Ita and M. Vaca. 2009. Drying of prickly pear cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*) in a forced tunnel. *Ener. Convers. Manage.* 50: 2119-2126.
- Maki-Díaz, G., C. B. Peña-Valdivia, R. García-Nava, M. L. Arévalo-Galarza, G. Calderón-Zavala, y S. Anaya-Rosales. 2015. Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia* 49: 31-51.
- Medina-Torrez, L., J. A. Gallegos-Infante, R. F. Gonzalez-Laredo, and N. E. Rocha-Guzman. 2008. Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus-indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *Food Sci. Technol-Leb.* 41: 1183-1188.
- Midilli, A. H., Z. Kucuk, and Yapar. 2002. A new model for single-layer drying. *Dry. Technol.* 20: 1503-1513.
- Panchariya, P. C., D. Popovic, and A. L. Sharma. 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. *J. Food Eng.* 52: 349-357.
- Rahman, M. S., C. O. Perera, and C. Thebaud. 1997. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Res. Int.* 30: 485-491.
- Touil, A., S. Chemkhi, and F. Zagrouba. 2010. Modelling of the drying kinetics of *Opuntia ficus-indica* fruits and cladodes. *Int. J. Food Eng.* 6: 11-21.
- Vasconcelos, J. L. A., A. S. C. Andrade, M. I. S. Maciel, N. B. Guerra, and M. A. S. Vasconcelos. 2012. Osmotic dehydration of the indian fig (*Opuntia ficus-indica*) with binary and ternary solutions. *Int. J. Food Sci. Tech.* 47: 2359-2365.
- Waewsak, J., S. Chindaruksa, and C. Punlek. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. *Thammasat Int. J. Sci. Tech.* 11: 14-20.
- Westerman, P., G. White, and I. Ross. 1973 *Trans. ASAE* 16: 1136-1139.
- White, G. M., I. J. Ross, and R. Ponekert. 1981. Fully exposed drying of popcorn. *Trans. ASAE* 24: 466-468.
- Yagcioglu, A., A. Degirmencioglu, and F. Cagatay. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *In: Bascetincelik, A. (ed). Proc. 7th Int. Congress on Agricultural Mechanization and Energy: 565-569.*
- Yaldiz, O., and C. Ertekin. Thin layer solar drying of some vegetables. 2001. *Dry. Technol.* 19: 583-597.
- Yaldiz, O., C. Ertekin, and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy* 26: 457-465.