

Secado de nopal (*Opuntia ficus*) utilizando secador solar con sistema de reflectores

TORRES, José*†, HERNÁNDEZ, Oscar, ARCE, Gerardo y VIZUET, Jonathan

Recibido Enero 05, 2016; Aceptado Febrero 25, 2016

Resumen

En este artículo se investigó el comportamiento de temperaturas y evolución de secado de trozos de nopal verdura (*Opuntia ficus*). El experimento se realizó con un secador solar con sistema de reflectores de tipo indirecto por convección natural el día 7 de septiembre de 2016 en Nicolás Romero, Estado de México. El nopal verdura se cortó en trozos y se sumergió en una solución compuesta de agua y cloruro de sodio durante 20 minutos, después se colocaron en charolas dentro de la cámara de secado del sistema, se registraron diferentes temperaturas dentro del secador solar así como también la temperatura ambiente del lugar donde se llevó a cabo la prueba, todas estas temperaturas se registraron en intervalos de 10 minutos por un periodo de 8 horas. Así mismo se registraron las masas del producto por intervalos de 30 minutos durante la prueba de secado. Las curvas de secado se obtuvieron al graficar la razón de humedad adimensional (MR) contra el tiempo de secado, su comportamiento se modeló utilizando el Modelo Exponencial. Los resultados mostraron que a partir de un secador solar con sistema de reflectores se logró eliminar un promedio de 70.97% de contenido de humedad del producto.

Secado de nopal, Curva de secado, Sistema de reflectores solares

Abstract

In this work the behavior of drying temperatures and evolution pieces of nopal (*Opuntia ficus*) was investigated. The experiment was performed with a solar dryer with indirect reflector system by natural convection type on September 7, 2016 in Nicolas Romero, Estado de Mexico. The nopal was cut into pieces and dipped into a solution composed of water and sodium chloride for 20 minutes solution, then placed in trays in the drying chamber system, different tempera were recorded within the solar dryer as well as ambient temperature of the place where the test was conducted, all these temperatures were recorded in 10 minute intervals for a period of 8 hours. Also the masses of the product registraron intervals of 30 minutes during the drying test. Drying curves were obtained by plotting the dimensionless moisture ratio (MR) against the drying time, their behavior was modeled using the exponential model. The results showed that from a solar dryer with reflector system succeeded in eliminating an average of 70.97% moisture content of the product.

Drying of nopal, Curve Drying System solar reflectors

Citación: TORRES, José, HERNÁNDEZ, Oscar, ARCE, Gerardo y VIZUET, Jonathan. Secado de nopal (*Opuntia ficus*) utilizando secador solar con sistema de reflectores. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-6: 39-46.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jobe_tv@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El nopal (*Opuntia ficus*) es una especie vegetal nativa de América, perteneciente a la familia de las cactáceas con presencia a lo largo de todo el continente. El nopal es una de las plantas más importantes que se cultiva en zonas áridas y semiáridas en todo el mundo, ya que presentan características adaptativas en su anatomía, morfología y fisiología que le permiten sobrevivir, crecer y reproducirse en condiciones de muy baja precipitación.

Actualmente se han reconocido 377 especies, 104 crecen en México en forma silvestre; 60 de las cuales son endémicas de nuestro país. Los nopales han generado estrategias adaptativas y pueden sobrevivir a las sequías. La mayoría de las especies carecen de agua, sus hábitats son regiones áridas y semiáridas donde no se puede cosechar otra verdura, gran ventaja ya que más de 45% del territorio mexicano tiene esta característica.

El nopal es parte fundamental de la cultura y de la alimentación del mexicano. Como alimento posee características nutricionales únicas debido a su alto contenido de fibras, pectina, mucilago y minerales, es recomendado para sopas, ensaladas, guisos, asados o como guarnición. Su sabor suave le permite entrar en fácil combinación con otros alimentos como el huevo, chiles, camarones, salsas, carnes, quesos y lograr una variedad succulenta de platillos originales. También se combina en bebidas como licuado o jugos y frutas y es usado en el proceso de producción de bebidas fermentadas como el pulque y el conche.

Su versatilidad le permite ser consumido en polvo (deshidratado y molido) del que se elaboran dulces, panes, tortillas, galletas o tostadas; o como fruto, se emplea en dulces, mermeladas y jaleas.

En la medicina popular mexicana el nopal es utilizado para tratar la diabetes mellitus y el colesterol, debido a que contiene saponinas, es adecuado para evitar la obesidad y la industria farmacéutica utiliza el mucilago contenido en el interior de las pencas para elaborar protectores gástricos y capsulas.

La mencionada cactácea posee un alto porcentaje de humedad de 95%, que limita su vida útil, siendo ésta de 1 a 2 días a temperatura ambiente o de 7 días a 5° C. Por este motivo se ve la necesidad de buscar alternativas de diseño de prototipos para deshidratado (secadores solares) que permitan aumentar la vida de anaquel del producto a bajo costo.

Con un diseño óptimo o adecuado es posible que un secador solar puede alcanzar una gran eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar.

El deshidratado se ha utilizado desde tiempos inmemoriales para conservar productos alimenticios. Secado al aire libre es el más método de uso común, especialmente en los países tropicales y subtropicales.

Sin embargo, varias desventajas por lo general se enfrentan: daño al producto causado por roedores, aves e insectos; la degradación del producto debido a la exposición a la luz solar, lluvia, tormentas, y el rocío dirigir; la contaminación con partículas y gases debido al aire contaminación; posible agrietamiento del producto y la pérdida de capacidad de germinación; reducción de la calidad durante almacenamiento debido a secado deficiente o no-uniforme. En este trabajo se estudia el secado de muestras de nopales, empleando un prototipo de secador solar de tipo indirecto, cien por ciento por convección natural, se ha incluido en su diseño un sistema de reflectores solares junto al colector solar, buscando incrementar la energía en dicho prototipo.

Se analizan variables ambientales como son la temperatura ambiente y las temperaturas dentro del secador solar, así como también en la calidad del producto seco.

Debido a que el proceso de secado es por convección natural es un método de secado económico comparado con otras técnicas de secado. Se ha utilizado un modelo matemático empírico para simular el proceso de secado del nopal, así como el diseño del equipo de secado. El modelo empírico utilizado es el propuesto por Newton.

Descripción del Método

El nopal verdura (*Opuntia ficus*) se adquirió en el mercado municipal de Nicolás Romero, Estado de México. Se seleccionó visualmente con base a su grado de madurez, apariencia y tamaño.

Se sumergió en una solución acuosa compuesta por 2 litros de agua y 20 onzas de cloruro de sodio por un tiempo de 20 minutos, posteriormente se enjuagaron en agua limpia y la humedad superficial se removió con un paño limpio.

Se cortaron trozos de aproximadamente 30 mm x 4 mm x 4 mm, y se colocaron en cinco charolas como se muestra en la Figura 1. Por un periodo de 10 minutos se expusieron al sol antes de colocarlas dentro del secador solar. Cabe mencionar que se registraron las diferentes masas correspondientes a cada una de las charolas con el nopal fresco.



Figura 1 Trozos de nopales frescos. Fuente J. Torres.

La deshidratación se realizó en un secador solar con sistema de reflectores, de tipo indirecto, cien por ciento por convección natural. Las partes principales del secador solar con sistema de reflectores se muestran en la Figura 2.

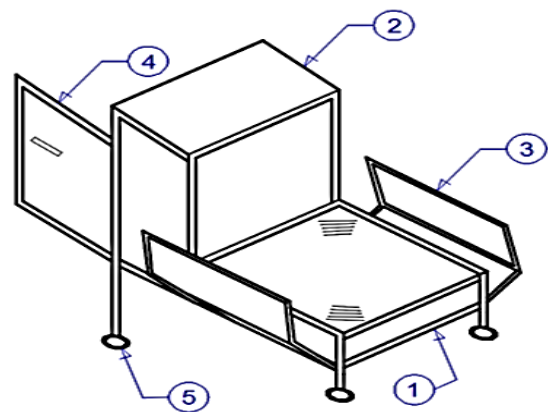


Figura 2 Secado solar con sistema de reflectores. 1 Concentrador solar. 2 Cámara de secado. 3 reflectores solares. 4 Puerta de la cámara de secado. 5 Ruedas. Fuente J. Torres

Las dimensiones del secador solar son de 60 cm de ancho x 95 cm de largo y 120 cm de altura. En la siguiente Figura 3 se muestra el secador solar.

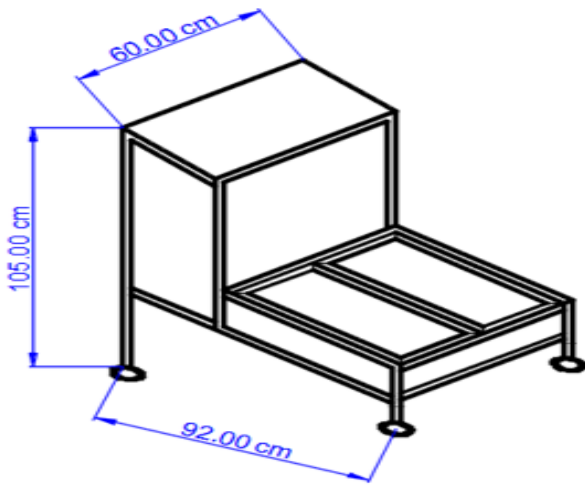


Figura 3 Secador solar con sistema de reflectores. Fuente J. Torres

Una vez expuesto por 10 minutos las charolas con el producto a deshidratar, estas se fueron colocando en la cámara de secado del prototipo, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4 Cámara de secado. Fuente J. Torres

Ya colocadas las charolas dentro de la cámara de secado y completamente cerrada, se extendieron los reflectores solares para potencializar la energía en el colector solar y a su vez en la cámara de secado, como se muestra en la Figura 5.

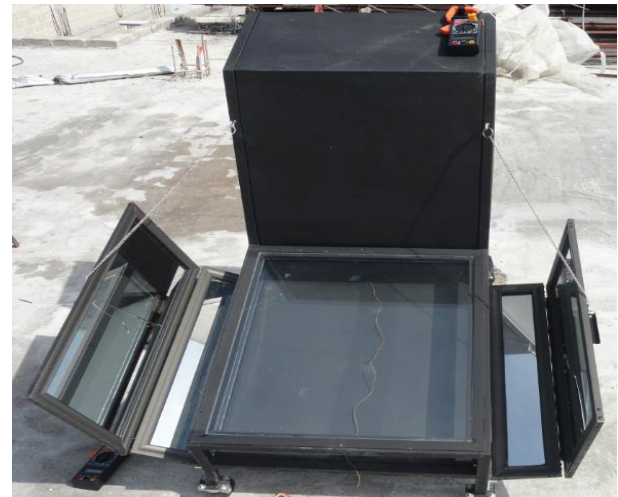


Figura 5 Secador solar con sistema de reflectores extendidos. Fuente J. Torres

Las pruebas se realizaron el día 7 de septiembre del 2016, el horario en el cual se llevó a cabo dichas pruebas fueron de 10:00 horas a 18:00 horas. En este periodo de tiempo se registraron con intervalos de 10 minutos cuatro temperaturas (Temperatura del ambiente, Temperatura a la salida del colector solar, Temperatura en medio de la cámara de secado y Temperatura en la salida de la cámara de secado). Ver Figura 6.

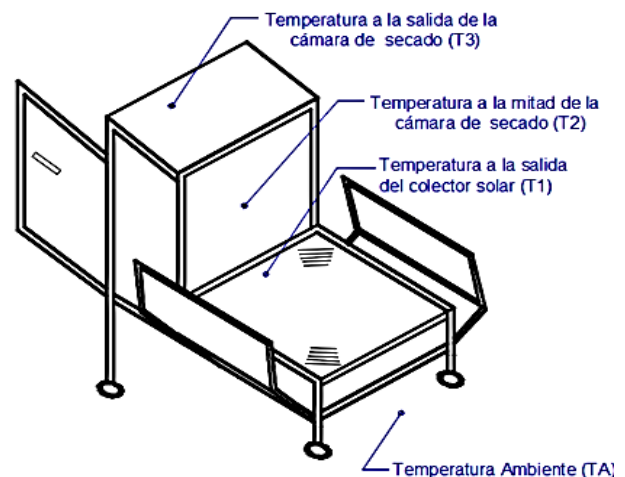


Figura 6 Temperaturas registradas en el secador solar con sistemas de reflectores. Fuente J. Torres

Para evaluar el porcentaje de humedad retirada, se consideró la masa del producto por charola en intervalos de 30 minutos durante toda la prueba.

Análisis de humedad

El componente más abundante y el único que casi está presente en los alimentos es el agua. La determinación del contenido de humedad de los alimentos es una de las más importantes y ampliamente usadas en el proceso y control de los alimentos ya que indica la cantidad de agua involucrada en la composición de los mismos.

Los valores del contenido de humedad en todas las muestras se transformaron en razones de humedad adimensionales suponiendo que el contenido de humedad final es el contenido de humedad en el equilibrio. La razón de humedad (MR), un contenido de humedad adimensional se puede calcular de acuerdo a:

$$MR = \frac{Mt - Me}{Mo - Me} \quad (1)$$

Donde Mo, Mt y Me son el contenido de humedad inicial, en cualquier momento (t) y en el equilibrio respectivamente. El contenido de humedad en el equilibrio (Me) es extremadamente pequeño comparado con el contenido de humedad inicial (Mo) y en cualquier momento (Mt).

Existen diferentes modelo matemáticos que describen el proceso deseado de productos a partir de datos experimentales:

Modelo de Page:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

Modelo de Newton:

$$MR = \exp(-kt) \quad (3)$$

Modelo de Page Modificado:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (4)$$

Modelo Exponencial:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5)$$

Modelo Logarítmico:

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (6)$$

Análisis estadístico

Para evaluar el ajuste del modelo matemático utilizado con los datos experimentales, se utilizaron los siguientes coeficientes estadísticos: CHI-cuadrado (X^2), suma de los errores al cuadrado (SSE) y raíz cuadrada de los errores al cuadrado (RMSE).

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (7)$$

$$SSE = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (9)$$

Donde MR_{exp,i} representan la relación de humedad obtenida experimentalmente, MR_{pre,i} son las predicciones hechas por los modelos matemáticos, N es el número de datos y z el número de constantes. El ajuste y los cálculos de estos análisis estadísticos se realizaron con el programa Microsoft Excel 2013.

Resultados

Las temperaturas registradas en el secador solar: Temperatura del ambiente (Ta), Temperatura a la salida del colector solar (T1), Temperatura en medio de la cámara de secado (T2) y Temperatura en la salida de la cámara de secado (T3), se puede observar en el Gráfico 1.

Las temperaturas más altas son las obtenidas son las correspondientes a la salida del colector solar (T1), obteniendo una temperatura promedio de 36.651°C, esto se puede observar en la Tabla 1.

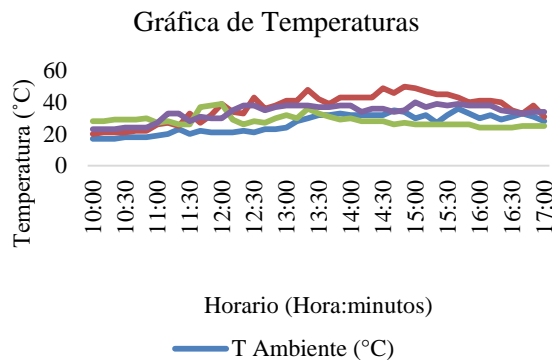


Gráfico 1 Temperaturas registradas en la prueba de secado de nopal. *Fuente J. Torres*

Temperatura	Temperatura
	Promedio (°C)
Ambiente (Ta)	26.53
Salida del colector solar (T1)	36.651
Mitad de la cámara de secado (T2)	28.348
Salida de cámara de secado (T3)	33.767

Tabla 1 Promedio de temperaturas en la prueba realizada *Fuente J. Torres.*

En el Gráfico 2 se presentan los resultados obtenidos correspondientes al porcentaje promedio de humedad retirada en el secado de nopal por charola, cabe mencionar que el orden de la numeración designada a las charolas es de forma ascendente en la cámara de secado. Se observa que en la charola número 1 se obtuvo el mayor porcentaje de humedad retirada (77.02 %) y en la charola número 2 se obtuvo el menor porcentaje de humedad (65.27 %), el porcentaje promedio de humedad retirada en la prueba de secado del nopal corresponde a 70.97 %. Los cálculos para obtener dichos porcentajes de humedad están basados en la ecuación 1.

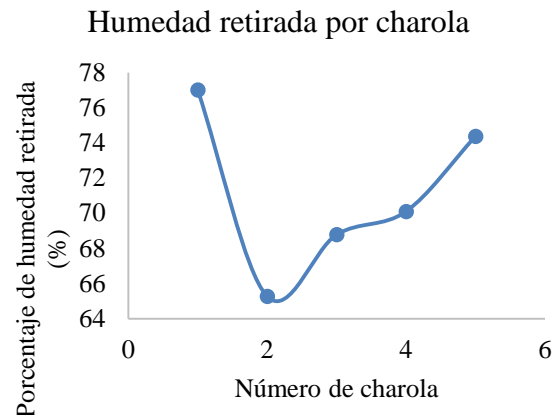


Gráfico 2 Porcentaje de humedad retirada por charola. *Fuente J. Torres*

Modelo matemático y valores estadísticos obtenidos

Los datos experimentales se aplicaron en el modelo exponencial (ecuación 5). El Gráfico 3 representa la curva de secado obtenida de los datos experimentales así como del modelo matemático para el secado de nopal.

La Tabla 2 representa la ecuación matemática exponencial y coeficientes estadísticos: CHI-cuadrado (X^2), suma de los errores al cuadrado (SSE) y raíz cuadrada de los errores al cuadrado (RMSE).

La comparación entre los resultados experimentales y simulados mostró que la correlación obtenida describe de manera satisfactoria la cinética del secado con base a las condiciones operativas consideradas en el dicho proceso de secado.

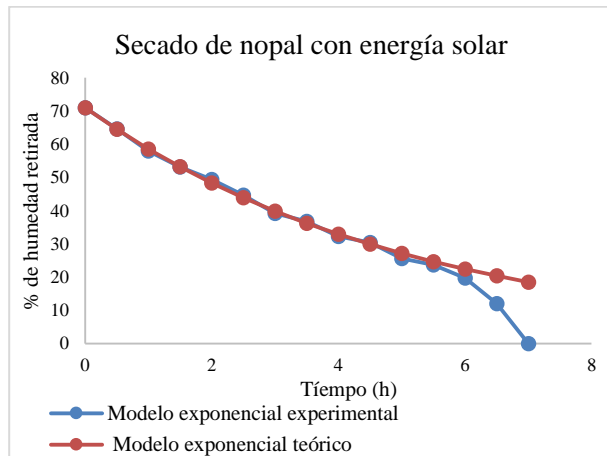


Gráfico 3 Porcentaje de humedad retirada por charola
Fuente J. Torres

Ecuación: Modelo Exponencial	$MR(t) = a e^{-kt}$ $MR(t) = 70.973 e^{-0.192 t}$
Valores estadísticos	$a = 70.973$; $k = 0.192$ $SSE (r) = 0.976$; $X^2 = 0.069$; $RMSE = 0.25$

Tabla 2 Modelo numérico de secado solar del nopal
Fuente J. Torres

Agradecimientos

Al Dr. Hilario Terres Peña por sus conocimientos compartidos. También los autores agradecen al personal de la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez por su apoyo para el desarrollo de la presente investigación.

Conclusiones

Los resultados observados en este trabajo muestran que es posible secar trozos de nopal verdura (*Opuntia ficus*), utilizando un secador solar de tipo directo por convección natural.

Una de las aportaciones en cuanto al diseño de este tipo de secadores es la implementación de reflectores solares buscando con esto potencializar la energía tanto en el colector solar como en la cámara de secado.

Cabe mencionar que el promedio de temperatura ambiente registrado en la prueba realizada oscila en promedio a los 25 °C y en la estación del año en donde se realizó dicha prueba esta se caracteriza por tener temperaturas de moderadas a cálidas durante la mañana con cielos despejados que se transforman en cielos nublados con lluvias casi todos los días por las tardes.

Sin embargo con los reflectores considerados en el sistema se obtuvo un promedio de 70.97 % de humedad retirada del producto en un tiempo de ocho horas el día 7 de septiembre de 2016.

Referencias

- Almanza, R. y Muñoz- Gutiérrez, F. (2003). Ingeniería de la energía solar (1ª Edición). México: Cromocolor
- Anaya-Pérez, M. A. (2001). History of the use of *Opuntia* as forage in México. In: C. Modragón-Jacobon & S. Pérez-González (Eds.), *Cactus (Opuntia spp.) as storage* (pp. 5-12). Rome, Italy: FAO.
- Colectivo (Gabinete de Estudios de CENSOLAR). (2009). La energía solar: aplicaciones prácticas. España; Progensa
- Han, H. y Felker, P. (1997). Field validation of water-use efficiency of a CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, 36, 133-148.
- Guzmán Loayza, D., y J. Chávez. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*) para el consumo humano. Recuperado el 10 de septiembre del 2016, de <http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=>
- TORRES, José, HERNÁNDEZ, Oscar, ARCE, Gerardo y VIZUET, Jonathan. Secado de nopal (*Opuntia ficus*) utilizando secador solar con sistema de reflectores. *Revista de Energía Química y Física* 2016

Jutglar L. (2004). Energía Solar (1ª Edición). Barcelona, España: ceac.

Manrique, José A. (1984). Energía solar: fundamentos y aplicaciones fototérmicas. (2ª Edición). México: Harla

Morán L. y Pérez M. (2013). El nopal, alimento y cultura del mexicano.

Recuperado el 12 de septiembre del 2016, de <http://www.publimetro.com.mx/unam/el-nopal-alimento-y-cultura-del-mexicano/mmbh!WgWNinaEpIQ/>

Yaldiz O., Ertekin C. Thin layer solar drying of some vegetables. Dry Technol. 2001;19:p 583–596.

Zamora A. (2013). EL NOPAL: características y usos. Recuperado el 10 de septiembre del 2016, de

<http://mexicoalnatural.com/2013/02/el-nopal-caracteristicas-y-usos/>