

CINÉTICA DEL TOMATE EN UN SECADERO SOLAR TENDALERO TÚNEL

V. García, A. Iriarte¹, S. Bistoni, S. Justinovich²,

M. A. Calahorra³, G. Capece³ y G. Dávila Cruz³

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca

M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. victorgarcia959@gmail.com

Recibido 27/07/17, aceptado 30/09/17

RESUMEN: En este trabajo, se presenta un análisis de la cinética del secado de tomates con energía solar. Para realizar este estudio, las experiencias se han realizado en Chilecito – La Rioja utilizando un tendalero solar activo tipo túnel. Los tomates seleccionados fueron cortados por la mitad colocados en el secadero sin pretratamiento, y tratados con escaldado y con una mezcla de metabisulfito y sal gruesa. Se han obtenido sus curvas de secado, y los coeficientes utilizando el modelo de Page, que sirven para comparar con los valores experimentales. Se muestra la performance del comportamiento del modelo elegido con los resultados experimentales para las distintas variedades de tomate. El modelo matemático utilizado permite caracterizar matemáticamente el proceso de secado de las variedades de tomate utilizados con los datos experimentales, observándose una buena correlación entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo.

Palabras clave: cinética de secado, secado solar.

INTRODUCCIÓN

El secado de los productos agrícolas siempre ha sido de gran importancia para la conservación de los alimentos en el oeste de las Provincias de Catamarca y La Rioja de la República Argentina. El secado solar tradicional es una técnica bien conocida de conservación de alimentos que reduce el contenido de humedad del producto agrícola y, por tanto, evita el deterioro dentro de un período de tiempo considerado como el período de almacenamiento seguro.

Sin embargo, sin protección de la lluvia, la suciedad, el polvo y la contaminación por insectos, roedores y otros animales, la calidad de los alimentos puede ser seriamente degradada por lo que a veces se convierte en no comestible. Además, la consiguiente pérdida de calidad de los alimentos en los productos secos puede tener efectos económicos adversos en los mercados nacionales e internacionales (Lahsasni et al., 2004, Tiris et al., 1996).

El proceso de secado se puede realizar usando varios métodos de secado solar. Aunque para productos agrícolas, los secadores solares con calentador de aire solar proporcionan un mejor control de las condiciones de aire de secado requeridas, los secadores solares activos basados en invernaderos de túnel de plástico tienen un gran potencial y no requieren ninguna otra energía durante el funcionamiento. Por lo tanto, este tipo de secador solar puede convertirse en una alternativa más conveniente para el sector rural. Además, puede reducir las pérdidas de cosechas, mejorar la calidad del producto seco de forma significativa y es económicamente beneficioso en comparación con los métodos de secado tradicionales.

¹Investigador del CONICET

²Técnico INTA – IPAF PAMPEANO INTA

³Técnicos INTA – E.E.A. Chilecito La Rioja

El uso de un modelo de simulación es una valiosa herramienta para la predicción del rendimiento de los sistemas de secado solar (Steinfeld y Segal, 1986). Diamba y Munro (1993) han utilizado varias ecuaciones de capas delgadas para explicar el comportamiento de secado de los productos agrícolas, Madamba et al. (1996) para los trozos de ajo, Midilli (2001) para el pistacho, Yaldız et al. (2001) para uva, Bistoni y Iriarte (2016) para secado de pimiento para pimentón.

La diversidad de usos y sus atributos sensoriales y protectores de la salud humana han posicionado al tomate como uno de los frutos más importantes en la dieta humana. Sin embargo, su corta vida poscosecha en estado fresco limita su distribución. La deshidratación de este fruto ha permitido extender su utilidad, fortaleciendo su demanda. Hoy en día el tomate deshidratado es muy popular. Esta técnica, se lleva a cabo mediante diversos métodos, variando de artesanales a altamente sofisticados y a gran escala. La deshidratación permite reducir la actividad acuosa del fruto, reduciendo la susceptibilidad al deterioro, pero induciendo una serie de cambios físicos, químicos y de bioactividad que afectan su aceptación por el consumidor final. La magnitud de estos cambios depende de las condiciones de deshidratación. Las principales variables que modulan la velocidad del movimiento del agua en el alimento son el tiempo y la temperatura. El uso de altas temperaturas de deshidratación daña la apariencia del tomate (pardeamiento), reduce el contenido de nutrientes e induce un sabor dulce a consecuencia de la caramelización de los azúcares (Zanoni et al., 1998; Muratore et al., 2008). En general, la disminución de la temperatura de deshidratación alargará el tiempo de este proceso, pero el tomate obtenido tendrá mejores atributos nutricionales, color, aroma, sabor y textura (Rajkumar et al., 2007). Las temperaturas de secado inferiores a 65 °C permiten preservar el color y sabor del tomate. A estas temperaturas también se preservan mejor los compuestos, tales como polifenoles, flavonoides, licopeno, β-caroteno y ácido ascórbico (Toor et al., 2006), los cuales confieren a este fruto una alta actividad antioxidante y un efecto contra varias formas de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Shi et al., 1999).

Además de la temperatura y el tiempo de deshidratado, el incremento en la superficie de contacto del alimento con el fluido deshidratante también incrementa la velocidad de movimiento del agua desde el alimento hacia el exterior del mismo. Esto se logran rebanando y perforando el tomate (Rajkumar et al., 2007).

El objetivo de este trabajo, es presentar el estudio del secado solar de distintas variedades de tomate cortado longitudinalmente, utilizando un secadero solar tipo tendalero túnel activo. Se describen el sistema de secado, como así también los resultados experimentales. Los datos del secado fueron ajustados empleando el modelo matemático de Page, descrito por KavakAkpınar y Bicer (2008). Se muestran las curvas de secado, la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo.

MATERIALES Y MÉTODO

Los tomates utilizados en este estudio fueron de cinco variedades, se obtuvieron de Chilecito Provincia de La Rioja, (29°09'08.2"S 67°26'19.7" O), durante la temporada del verano de 2017. Los tomates maduros, bien coloreados y sanos se cosecharon a mano, se lavaron muestras homogéneas en agua y se cortaron en mitades longitudinales con cuchillo, luego se separaron en tres muestras, una sin tratamiento, a otra se le realizó un escaldado sumergiéndolos en agua hervida entre 30 y 60 segundos, y la última muestra fue sumergida en una solución de 9 litros de agua con 500 g de metabisulfito y 400 g de sal gruesa durante 10 min.

Descripción del secadero solar

En la figura 1, se muestra el esquema y vista del secadero solar. Consiste en un tendalero construido con tubos cuadrados de hierro de 0,025 m, tiene una altura de 0,80 m, 1,80 m de ancho y 16 m de largo, está dividido en dos partes en el mismo plano; el colector solar y el secadero de 1,8 m x 8 m respectivamente. Tiene una aislación de lana de vidrio de 5 cm de espesor con papel de aluminio en una de las caras, en ambos sectores. Esta lámina, expuesta al sol, fue pintada de negro mate. Entre la placa colectora y la cubierta plana de plástico UV térmico hay un espacio de 0,20 m (Bistoni e Iriarte, 2016).

El producto a secar, se ubica sobre 16 bandejas de 0,83 m² cada una, la estructura es de madera y cubiertas con media sombra, lo que hace una superficie para el producto de 13,3 m². La carga y descarga de los productos se realiza por los costados del módulo de secado.

Para evitar pérdidas de calor y protegerlo de los animales la estructura del tendalero se cubre con un plástico negro. Sobre el suelo, se colocó otro plástico negro para evitar el crecimiento del pasto, sobre él, se colocaron piedras para acumular parte de calor que gana el sistema en la parte inferior.

El aire circula por debajo de las bandejas y por el canal que queda formado entre la cubierta, la placa colectora y las bandejas. Todo el sistema tiene una segunda cubierta semicircular de plástico, también de UV térmico. El aire ambiente es forzado a circular a través del sistema mediante dos ventiladores axiales de 45 W cada uno. Estos ventiladores están ubicados en sector colector, pared este. La radiación solar que pasa a través de las cubiertas transparentes del colector y del secador. En este último, la radiación, aporta calor al producto y contribuye a un aumento en la velocidad de secado.

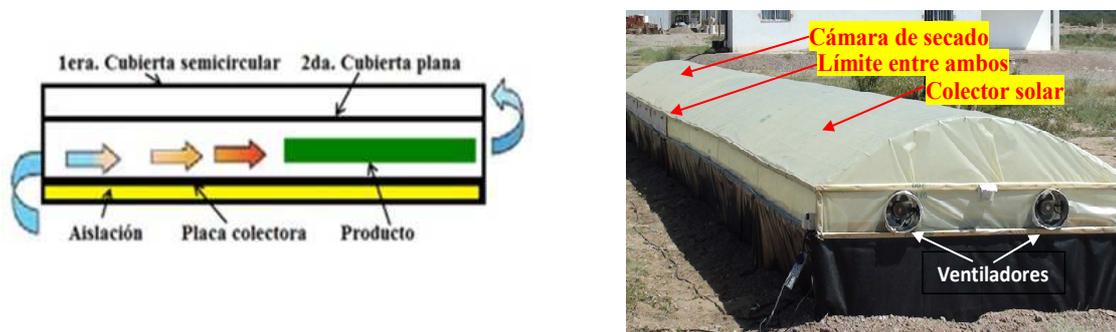


Figura 1.- Esquema del secadero y vista del prototipo instalado en Chilecito – La Rioja

Sistema de medición

Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con Data Logger tipo HOBOS tipo U12 individuales que permiten medir temperaturas en el rango de -40 °C a 75 °C (precisión de ± 0,5 °C, resolución de 0,02°C) y humedades relativas del aire entre 10 - 90 % (precisión de ±1 %, resolución de 0,1 %). Los sensores se ubicaron protegidos de la radiación solar directa. Las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia.

Las muestras testigos se pesaron con una balanza electrónica (Mettler ±0,1 g) y la pesada inicial y final de todo el producto con una balanza de plato (±1 g).

Cinética de secado

Modelo matemático de las curvas de secado

El proceso de secado involucra transferencia de calor y masa de manera simultánea, siendo por esta razón que en la mayoría de los casos se utiliza modelos semi-empíricos para analizar el secado de los productos agrícolas.

El problema de modelar las curvas de secado solar es generalmente elaborar una función del tipo $MR = f(t)$, donde MR es la relación de humedad que está dada por ecuación [1]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad [1]$$

Donde M es el contenido de humedad instantánea; M_o contenido inicial y M_e contenido de humedad de equilibrio. Como M_e generalmente es bajo para los productos alimenticios (Togrul y Pehlivan, 2004), se lo considera despreciable, por lo tanto, la relación de humedad ec. (1) se simplifica a ec. (2):

$$MR = \frac{M}{M_o} \quad [2]$$

Para describir la cinética y poder predecir la relación de humedad en función del tiempo de secado, en la mayoría de los estudios de secado se utiliza los modelos de relaciones matemáticas detallados por KavakAkpınar y Bicer (2008).

Para asegurar que el modelo elegido sea el que mejor ajuste el comportamiento del secado del producto, se requiere de métodos de análisis estadísticos de regresión y correlación. Los modelos de regresión lineal y no lineal son herramientas importantes para encontrar las relaciones entre las diferentes variables. La complejidad de los diferentes modelos, está en función de tratar de relacionar aspectos del producto, tales como espesor, humedad relativa, temperatura y velocidad del aire en el sistema de secado, con la pérdida de humedad.

En este trabajo, el comportamiento del proceso de secado de tomate, se ha modelado utilizando el modelo de Page, el cual se puede expresar por la ecuación, $MR = \exp(-kt^n)$. En la ecuación de Page, las constantes de la rapidez de secado (k y n) se han estimado aplicando una técnica de regresión lineal, mediante el programa SPSS (Statistical Package for Social Scientists) versión 22 software package.

El coeficiente R^2 fue uno de los principales criterios para la selección de la mejor ecuación. Asimismo para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido (χ^2), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo seleccionado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de R^2 y los valores más bajos de χ^2 , MBE y RMSE. Por otro lado se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y aquellos en que la correlación de los coeficientes estimados no fue superior a 0,80. Los índices estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad [3]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i}) \quad [4]$$

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

Dónde; MR_{exp} : relación de humedad experimental; MR_{pred} : relación de humedad predicha; z: número de constantes en el modelo; N: número de datos

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En general, las condiciones climatológicas durante los ensayos de secado solar realizadas en el mes de febrero, fueron buenas, con irradiancia de hasta 1000 W.m^{-2} , la temperatura del aire estuvo entre $19,5^\circ \text{ C}$ y $36,6^\circ \text{ C}$, como se muestran en la figura 2, con humedad relativa del ambiente entre 16,6 % y 74%.

Análisis del ensayo de secado

El secadero se cargó aproximadamente 100 kg de tomate, cosechado por productores vinculados con la Estación Experimental del INTA de Chilecito, La Rioja. El producto se colocó cubriendo la superficie de las bandejas en una sola capa. La determinación de los parámetros de secado se realizó a través muestras de cada variedad, de aproximadamente 100 gr cada una, ubicadas en diferentes lugares del secadero y respetando las variedades del tomate.

Las variedades que se utilizaron para este trabajo fueron: V1: FOKKER; V2: 7883; V3: LEADER;

V4: ISI 29797; V5: ISI 22706. Se realizaron pesadas durante los tres días de secado. El peso seco del producto se obtuvo secando una muestra de cada variedad en una estufa con temperatura de 104 °C, hasta obtener peso constante.

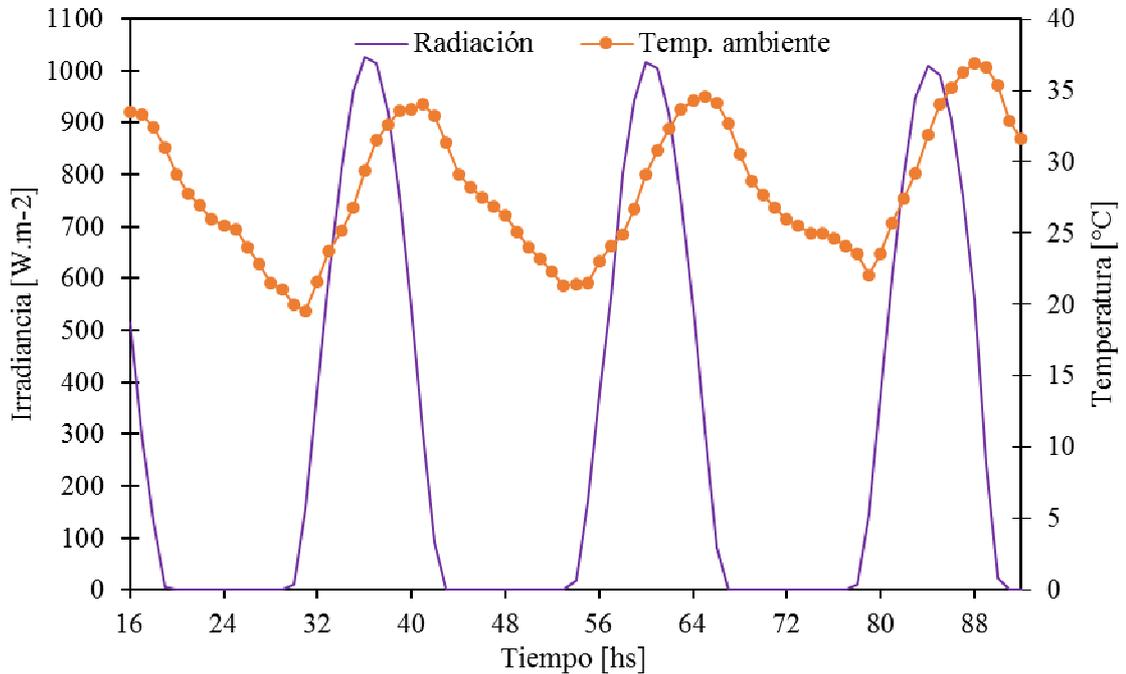


Figura 2.- Temperatura y radiación durante los días de secado

Cámara de secado

Del análisis de los datos obtenidos de la cámara de secado se desprende que la temperatura del aire durante los tres días de secado estuvo comprendida para el primer día de secado entre 16,5° C y 58° C, el segundo día la temperatura mínima fue de 19° C y la máxima temperatura medida fue de 67° C, y el tercer día estuvo entre 20° C y 67° C, como se muestra en la figura 3.

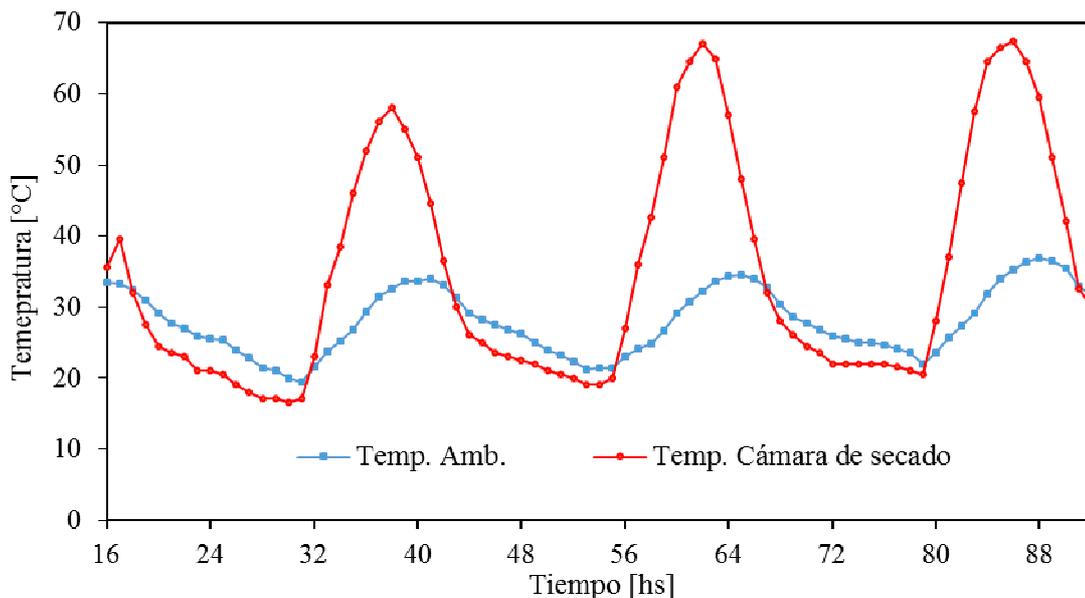


Figura 3.- Temperatura ambiente y temperatura interior de la cámara de secado

En la Fig. 4 se grafica el contenido de humedad, expresado en kg kg^{-1} , referido a base seca (bs), en función del tiempo para cinco muestras seleccionadas. Después de 60 horas de secado, sin contar el periodo nocturno, las muestras perdieron el 81 %, 80%, 81 %, 85 % y 85 % de agua respectivamente.

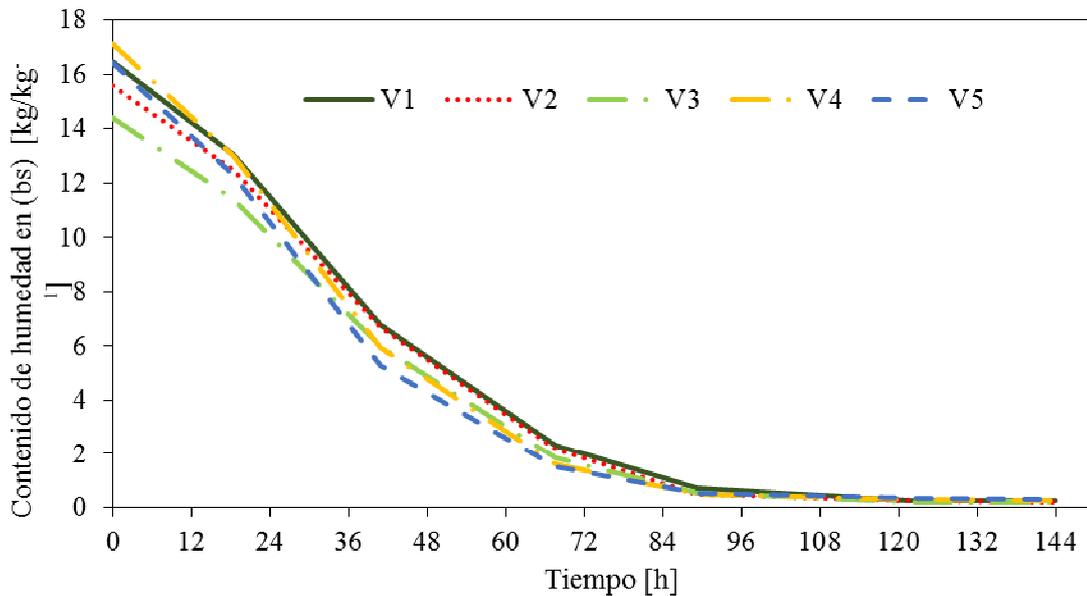


Figura 4.- Contenido de humedad en base seca en función del tiempo

Se observa que la velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso de secado, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad va disminuyendo, como era de esperar. Se advierte, en comparación con trabajos anteriores (Iriarte et al., 2012), que la velocidad de secado del nuevo diseño aumentó en forma significativa, aun en las primeras horas del proceso. Una vez finalizado el proceso, los tomates fueron retirados del secadero y acondicionados para lograr la homogeneización del producto respecto al contenido de humedad. Las velocidades de secado de cada variedad en $[\text{kg.kg}^{-1}\text{hs}^{-1}]_{\text{bs}}$, en función del contenido de humedad $[\text{kg.kg}^{-1}]_{\text{bs}}$ y del tiempo en horas ajustadas por cuadrados mínimos durante el proceso secado, se detallan en la Tabla 1. En la Fig. 5 y 6, se muestran las gráficas correspondientes.

$V_{V1} = 0,0591\ln(x) + 0,0913R^2 = 0,9684$	$dV_{V1} = -0,0025t + 0,2938 R^2 = 1$
$V_{V2} = 0,0535\ln(x) + 0,0924 R^2 = 0,9839$	$dV_{V2} = -0,0022t + 0,2677R^2 = 0,9978$
$V_{V3} = 0,054\ln(x) + 0,0845R^2 = 0,9817$	$dV_{V3} = -0,0022t + 0,2561 R^2 = 0,9998$
$V_{V4} = 0,0793\ln(x) + 0,0822R^2 = 0,967$	$dV_{V4} = -0,0034x + 0,3479R^2 = 0,9943$
$V_{V5} = 0,0901\ln(x) + 0,0601R^2 = 0,9304$	$dV_{V5} = -0,0035x + 0,3479R^2 = 0,9894$

Tabla N° 1. Ecuaciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y el tiempo

Modelo de ajuste de las curvas de secado

En la tabla 2 se muestran los resultados del modelo de Page para la cinética de secado de las variedades de tomate utilizadas en la experiencia. El resto de los modelos propuesto en bibliografía, fueron desechados porque las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y/o la correlación de los coeficientes estimados fue superior a 0,80.

Del modelo Page seleccionado como ajuste se advierte que para las cinco variedades, el R^2 es aproximadamente 1.

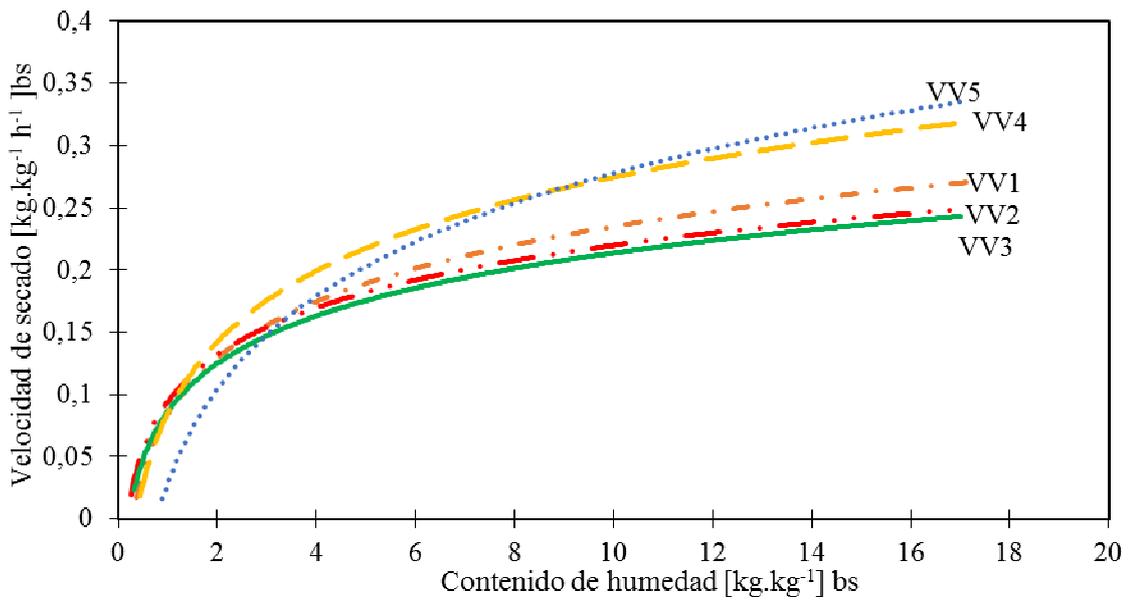


Fig. 5. Velocidad de secado en función del contenido de humedad

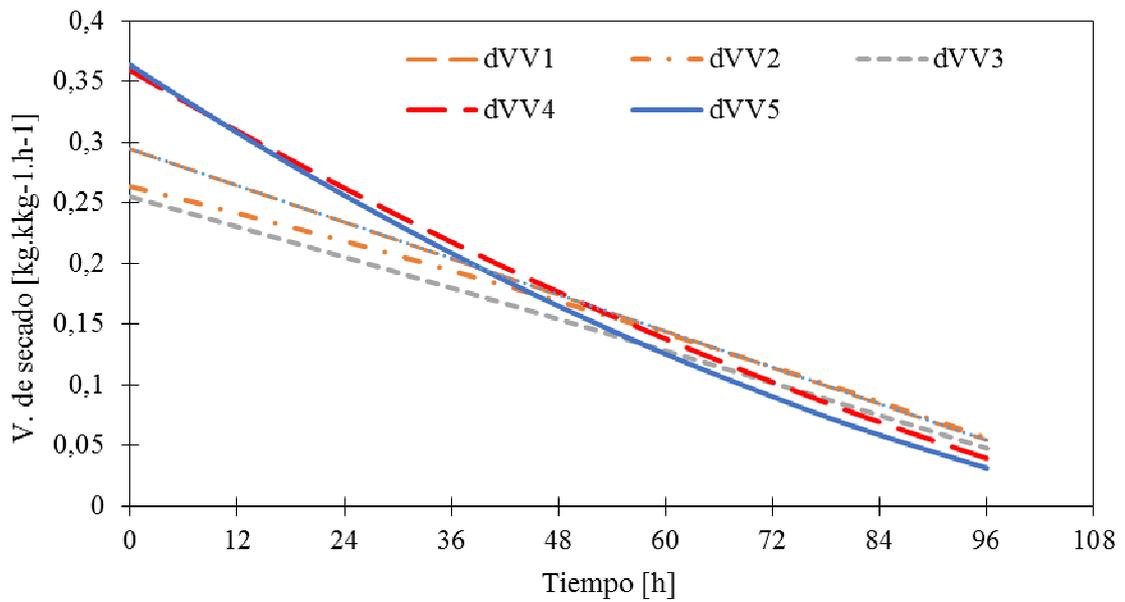


Fig. 6. Velocidad de secado en función del tiempo

En la Foto 1 y 2, se muestran las bandejas con tomate recién cargado y luego del secado.



Foto 1. Tomate fresco colocado en el secadero

Foto 2. Tomate deshidratado

Modelo	Variedades	N	k	R ²	χ ²	MBE	RMSE
PAGE	V1	1,621	0,002	0,999	0,00007	0,0025	0,0071
	V2	1,686	0,002	0,999	0,00010	0,0034	0,0085
	V3	1,668	0,002	0,999	0,00007	0,0049	0,0088
	V4	1,634	0,002	0,999	0,00013	0,0072	0,0098
	V5	1,601	0,003	0,998	0,00014	0,0074	0,0012

Tabla N° 2. Resultados del ajuste de los modelos de las curvas de secado

De acuerdo al análisis de los valores de la tabla 2, las ecuaciones de ajuste para cada variedad son:

$$MR_{(V1)} = \exp(-0,002t)^{1,621} [6]$$

$$MR_{(V2)} = \exp(-0,002t)^{1,686} [7]$$

$$MR_{(V3)} = \exp(-0,002t)^{1,668} [8]$$

$$MR_{(V4)} = \exp(-0,002t)^{1,634} [9]$$

$$MR_{(V5)} = \exp(-0,003t)^{1,601} [10]$$

La performance del modelo elegido para todas las variedades se ilustra en la Fig. 7. Como se aprecia los datos están distribuidos alrededor de la línea de ajuste por cuadrados mínimos, lo que indica que el modelo matemático seleccionados es adecuado para describir el comportamiento de las distintas variedades de tomate deshidratadas.

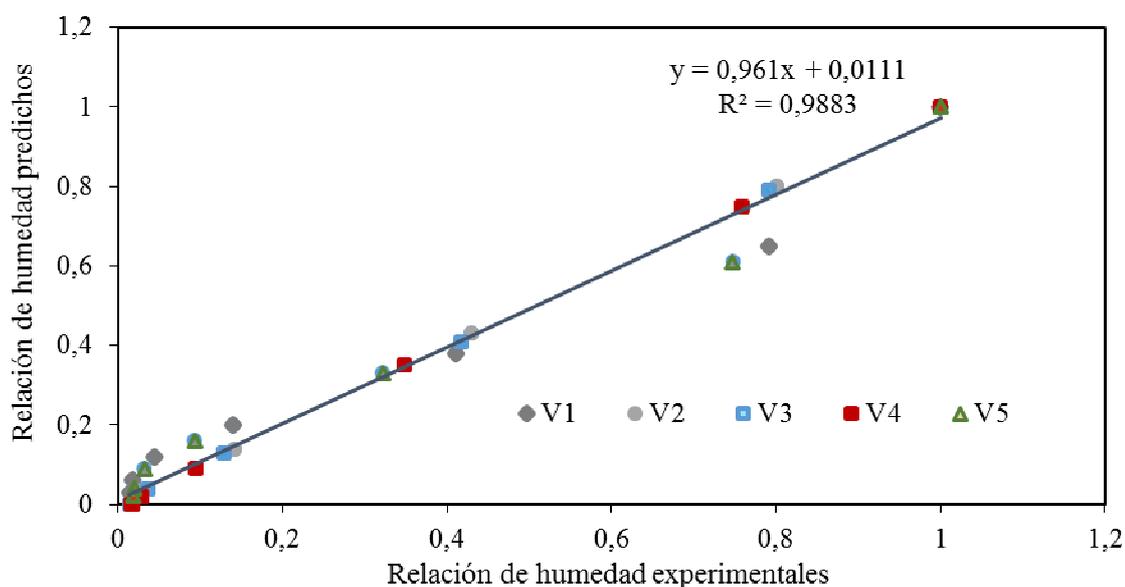


Fig. 7. Comparación de los valores de la relación de humedad experimentales y predichos para el modelo de Page

CONCLUSIONES

El secadero tendalero túnel utilizado permitió aumentar la temperatura del aire sobre el producto, aumentando la velocidad de secado disminuyendo considerablemente el tiempo en la deshidratación del tomate comparado con los sistemas tradicionales. Las temperaturas de secado fueron las óptimas para preservar el color y sabor del producto final.

Cabe señalar que el secado realizado con los tratamiento de escaldado y sulfitado ha permitido obtener un producto con un buen aspecto.

El modelo de Page permitió caracterizar matemáticamente el proceso de secado de las variedades de tomate utilizados ajustado con los datos experimentales. Se observó una buena correlación entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo.

REFERENCIAS

- Bala B. y Woods J. (1989). Simulation and Optimization of natural convection solar drier. *Journal of Agricultural Engineering*, 27, pp. 419-424.
- Bala, B.K., Woods, J.L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53 (3), pp. 259–266.
- Bistoni, S. e Iriarte, A. (2016). Secado de pimiento *capsicum annum L*, en un tendalero solar activo tipo túnel. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 37. pp. 61 – 70.
- Crank, 1975. *The Mathematics of diffusion*. Oxford University Press, London.
- Diamente, L. M. y Munro, P. A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51(4), pp. 271–276.
- Duran G. y M. Condori (2009). Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 13, pp. 121–129.
- Iriarte A., Bistoni S., Luque V., García V., Rodríguez C. y Brizuela L. (2012). Caracterización del secado de pimiento para pimentón en un tendalero solar activo tipo túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16, pp. 895-899.
- Iriarte A., S. Bistoni, M. Watkins, V. Luque, H. Sánchez y L. Brizuela. (2011). Análisis de un secadero solar tendalero con torre central en convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.15, pp. 225 - 232.
- Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Lara y L. Brizuela. (2010). Secadero tendalero con chimenea solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 14, pp. 2.01- 2.08.
- Jairaj K., Singh S. y Srikant K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying, *Solar Energy* 83, pp. 1698-1712.
- Kavak Akpinar E. y Y. Bicer (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management* vol. 49, pp. 1367–1375.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), pp. 75–97.
- Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25(8), pp. 715–725.
- Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management* 44, pp. 1111-1122.
- Panchariya P. C., Popovic D., and Sharma A. L. (2002). Thin layer modelling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, vol.52, pp.349-357.
- Philip, S. K., Sharma, S., Rao, C.S. (1993). Installation and performance monitoring of a commercial solar dryer for chillies. *Proceedings of the National Solar Energy Convention*. Vadodara, Gujarat, pp. 11–13.
- Steinfeld, A. y Segal, I. (1986). A simulation model for solar thin layer drying process. *Drying Technology*, 4, pp. 536–554.
- Tecante A. (1998). *Fundamentos de secado, extracción sólido - líquido y destilación*. Ed. Reverté
- Togrul y Pehlivan, 2004. Togrul, I.T. y Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, pp. 413–425.
- Trim, D.S. (1982). Development of a forced convection solar drier for red chilli. *Tropical Agriculture (Trinidad)* 59 (4), pp. 319–323.
- Yaldiz, O., y Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying some different vegetables. *Drying Technology*, 19(3), pp. 583–597.

ABSTRACT: In this work, an analysis of the drying kinetics of tomatoes with solar energy is presented. In order to carry out this study, the experiments have been carried out in Chilecito - La Rioja using a tunnel type active solar rack. The selected tomatoes were cut in half placed in the dryer without pretreatment and treated with blanching and a mixture of metabisulfite and coarse salt. Their drying curves have been obtained, and the coefficients using the Page model, which serve to compare with the experimental values. The performance of the model chosen with the experimental results for the different tomato varieties is shown. The mathematical model used allows to characterize mathematically the drying process of the tomato varieties used with the experimental data, observing a good correlation between the experimental values and those obtained by the model.

Keywords: drying kinetics, solar drying