

Caracterización de secador solar cilíndrico: Identificación de factores principales en el secado de tortilla

Characterization of a cylindrical solar dryer: Identification of the main factors in tortilla drying

ACUÑA-AVILA, Pedro Estanislao†*, CORTÉS-CAMARGO, Stefani, RÍOS-SEGUNDO, Ana Cecilia y CELAYA-CHATO, Edgar Jair

Universidad Tecnológica de Zinacantepec

ID 1^{er} Autor: *Pedro Estanislao, Acuña-Avila* / ORC ID: 0000-0002-1516-7853

ID 1^{er} Coautor: *Stefani, Cortés-Camargo* / ORC ID: 0000-0002-8766-6416

ID 2^{do} Coautor: *Ana Cecilia, Ríos-Segundo*

ID 3^{er} Coautor: *Edgar Jair, Celaya-Chato*

Recibido 09 Julio, 2018; Aceptado 28 Septiembre, 2018

Resumen

En el presente trabajo se muestra la caracterización de un secador de geometría cilíndrica y su desempeño en el secado de la tortilla. Es bien sabido, que productos como la tortilla son secados en los patios y techos con el inconveniente de que son susceptibles a la contaminación por el aire y por animales. En este sentido, como alternativa se propone el diseño de un secador de geometría cilíndrica de tubo vertical que puede ser construido con materiales baratos y de manera sencilla por cualquier persona. Para optimizar el tiempo de secado se diseñó una serie de corridas experimentales basadas en un diseño de experimentos en las que se consideraron como factores categóricos de experimentación la hora a la que se realiza el secado, el uso de reflectores semi-cónicos invertidos, la relación área/volumen del secador, la cantidad de producto a secar y el uso de ventilación interna. El secador tuvo un buen desempeño a cualquier hora a una temperatura promedio de 46°C, el secado de 1 Kg producto base seca varió entre 100 y 200 minutos dependiendo de las condiciones del secado.

Secador Solar, Reflectores Solares, Diseño de Experimentos

Abstract

In the present work the characterization of a cylindrical geometry dryer and its performance in the drying of the tortilla is shown. It is well known that products such as tortillas are dried in yards and roofs with the disadvantages that they are susceptible to contamination by air and animals. In this context, as an alternative it is proposed the design of a vertical cylindrical geometry dryer that can be built with cheap materials in easy way by anybody. To optimize drying time, a set of experimental runs was designed based on a experiments design in which the categorical factors of experimentation were the time of drying, the use of semi-conical reflectors, the area/volume ratio of the dryer, the quantity of product and the use of internal ventilation. The dryer had a good performance at any time at an average temperature of 46°C, the drying of 1 kg the product in dry basis varied among in 100 and 200 minutes depending of the drying condition.

Solar Dryer, Solar Reflector, Experiments Design

Citación: ACUÑA-AVILA, Pedro Estanislao, CORTÉS-CAMARGO, Stefani, RÍOS-SEGUNDO, Ana Cecilia y CELAYA-CHATO, Edgar Jair. Caracterización de secador solar cilíndrico: Identificación de factores principales en el secado de tortilla. Revista de Energía Química y Física. 2018. 5-16: 14-22.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: pedro.avila@utzin.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

1. Introducción

Desde la antigüedad, el secado es una de las técnicas más empleadas para la preservación de los alimentos. Específicamente, el secado de los alimentos a través de la exposición al sol es una técnica muy popular, sobre todo en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, la exposición directa a los rayos del sol en la azotea o patios de las casas puede ocasionar contaminación física, química o biológica del producto. Es por eso, que en los últimos años se han diseñado dispositivos que utilizan la radiación solar tanto para aislar al producto de posibles contaminaciones como para hacer más eficiente el uso de la energía solar y eliminar costos de combustibles o de energía eléctrica.

El-Sebaili & Shalaby (2012), identifican cuatro métodos de desecación por radiación solar: 1) ausente de dispositivo con una exposición directa al sol y todas las condiciones ambientales, 2) con un dispositivo cerrado que permite la exposición a la radiación solar donde el calor generado por la radiación solar evapora la humedad del producto, 3) indirectos, donde por un lado se calienta el aire y por variación en la densidad del aire frío-caliente recircula dentro de una cámara de secado, y 4) una combinación entre los métodos 2 y 3, donde ocurren simultáneamente.

Tomando en cuenta lo anterior, estos métodos dependen básicamente de los componentes que identifica Sodha & Chandra (1994) como i) receptor de radiación solar, ii) extractor de aire caliente, y la unidad de secado iii). De esta manera es como se han elaborado secadores que poseen varias características en común, como un panel inclinado que recibe la radiación solar y, ya sea por convección o por el uso de un ventilador, se transporta el aire caliente a una torre en donde se coloca el producto a secar en charolas horizontales.

Así mismo, tal como lo indican la mayoría de los expertos, el tiempo de secado depende mucho de variables incontrollables como la radiación incidente, y por lo tanto de la localización geográfica donde se realiza el secado, así como la hora a la que se realiza el proceso.

Tanto en secadores pequeños como de mayor escala, se observa que la torre en donde se coloca el producto tiene una geometría rectangular, debido a que las charolas en las que se acomoda el producto a secar tienen esa geometría y así se aprovecha todo el espacio. Sin embargo, habría que considerar que en las esquinas de la torre de secado puede haber condensación de humedad por gradiente de temperatura lo cual disminuiría la velocidad del secado. Además, mientras más grande es el secador, se desaprovecha la radiación solar que incide sobre la torre de secado tal como ocurre en el método 3 de El-Sebaili & Shalaby (2012).

En el presente trabajo se estudian los factores que favorecen el secado en un secador de construcción sencilla con geometría de tubo cilíndrico, similar al propuesto por Ferreira *et al.* (2008), pero ubicando al producto a secar dentro de lo que los autores denominan “chimenea”, pues como lo señala Vijayavenkataraman *et al.*, (2012) existe una búsqueda por reducir el área utilizada para hacer más eficiente el espacio en que se utilizan estos dispositivos.

Consideramos que un secador de geometría cilíndrica con paredes de un material absorbente de la radiación solar debería calentar mejor el aire que circula a través de él, y por lo tanto secará al producto. Por lo tanto, se estudiaron experimentalmente los principales factores que pueden afectar el secado de un producto modelo como lo es la tortilla, que en caso de no comercializarse como producto fresco, su valor comercial se revaloriza e incrementa después de un secado y un freído (Moreira *et al.*, 1995).

Los factores que se estudiaron fueron: la hora a la que se realizó el secado; la cantidad de material a secar; la utilización de un reflector de radiación solar para evitar la pérdida de calor en las zonas que no son irradiadas; la longitud del tubo de secado que tiene una influencia en el área efectiva de zona irradiada; y el uso de una ventilación asistida por un ventilador conectado a un panel solar.

Debido al alto número de efectos a estudiar, y todas las variables que pueden influir en este tipo de secados como son: la radiación incidente, la humedad del ambiente, la velocidad del aire circundante, etc; se redujo el número de experimentos para realizarlos bajo condiciones similares, por lo que se propuso utilizar un diseño de experimentos de modelo Taguchi (Rahmani, et al., 2018) para cinco factores fraccionados, dando un total de 16 corridas aleatorizadas. Los experimentos se realizaron para dar validez estadística a los resultados y disminuir el efecto de variables que no se pueden controlar, además, los resultados obtenidos mostraron aquellas variables a fijar para futuros experimentos con la finalidad de maximizar la velocidad de secado del producto.

El enfoque del presente trabajo, desde el punto de vista del diseño de experimentos, pretende encontrar los factores que más influyen en el desempeño de un secador solar con las características descritas, ya que como se ha mencionado anteriormente, existe una extensa diversidad de factores que modifican el secado por radiación solar y sin embargo, es de esperar que algunos factores afecten más en el desempeño del secador que otros.

El objetivo del trabajo consiste en determinar los factores con mayor influencia en el funcionamiento del secador solar con geometría cilíndrica de tubo vertical, en el secado de la tortilla, a través de un diseño de experimentos. Además, la utilización de este tipo de dispositivo puede disminuir drásticamente el capital invertido en su construcción que es una de las desventajas de este tipo de sistemas (Pangavhane & Sawhney, 2002).

A continuación, se explican los experimentos realizados para caracterizar el funcionamiento del secado, así como los resultados obtenidos de dichos experimentos, la discusión de los resultados obtenidos y una conclusión general sobre el funcionamiento del secador.

2.1. Construcción del secador

Consistió en un diseño muy simple de un cilindro de 10 cm de radio con un largo de 30 a 60 cm, las paredes son de celulosa de 100 μm de espesor, recubierta con pintura vegetal a base de negro carbón de 1 μm por ambos lados para absorber la radiación solar.

En la Figura 1 se aprecia el dispositivo y las modificaciones de altura del secador, el uso de semiconos refractantes de aluminio con una inclinación de 35° respecto a la horizontal de 30 cm de longitud y la ubicación del ventilador que funciona con un panel solar de 85 cm^2 cuya potencia es de 100 W/m^2 con voltaje máximo de 12 V. Los experimentos se realizaron en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Zinacantepec en la ubicación $19^\circ 18' 34.6'' \text{N}$ $99^\circ 49' 24.4'' \text{W}$ a 2760 msnm durante la primera semana del mes de Mayo del año 2018, con días ausentes de niebla y nubes donde se estima que la radiación promedio es de $6.21 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ (Boxwell, 2016).

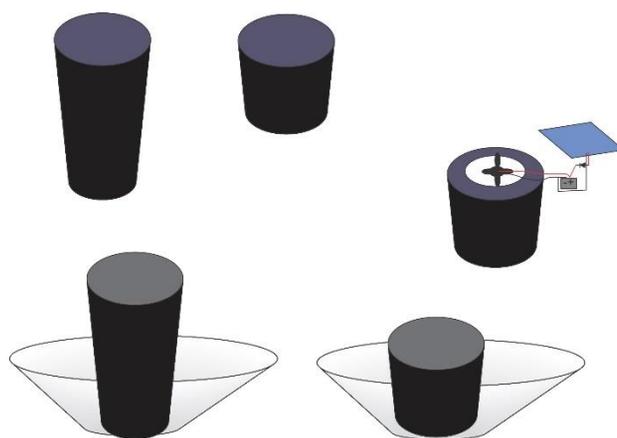


Figura 1 Secador solar con modificaciones en la altura del secador, uso de reflector y ventilador

Fuente: *Elaboración Propia*

2.2 Determinación de temperatura y humedad

La temperatura dentro del secador se monitoreó con un termopar tipo K con soldadura de 1 mm de diámetro en la punta para lograr fijarlo en distintas posiciones según el objeto de estudio. En este trabajo, se midió la temperatura para conocer el gradiente de temperatura dentro del secador, lo cual se obtuvo ubicando varios termopares en distintas secciones del secador, y manteniendo un termopar fijo en el centro del secador para conocer el comportamiento general de la temperatura durante el secado. También se monitoreó la temperatura ambiental para eliminar las experimentaciones que estuviesen por debajo o por arriba de una temperatura media de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Se determinó la humedad relativa del aire con un higrómetro en el exterior y en el interior del secador antes de iniciar los procesos de secado para determinar si las condiciones eran propicias para el secado, y durante todo el secado para tratar de determinar la humedad del aire al interior del secador.

Debido a que la humedad se modifica durante el secado, se tomaron sólo algunos valores para tratar de determinar la energía intercambiada al interior del secador. El porcentaje de humedad (%H) en base húmeda de la tortilla se calculó con la ecuación 1:

$$\% H = \frac{w_0 - w_f}{w_0} * 100 \quad (1)$$

Donde w_0 y w_f representa el peso inicial y final respectivamente. Y para expresar la humedad en base seca como la cantidad de Kg de agua/Kg de sólido seco (ss) se utilizó la ecuación 2:

$$Kg \text{ Agua/Kg de sólido seco (ss)} = \frac{\% H}{100 - \% H} \quad (2)$$

Finalmente para determinar la velocidad de secado, se dividió la cantidad de agua evaporada (Kg agua/Kg ss) entre 60 minutos, es decir, el tiempo de duración del experimento que representa el tiempo promedio donde todavía no se ha secado gran parte del producto, por lo que permitió hacer comparaciones adecuadas con el resto de experimentos.

2.3 Diseño de Experimentos

Los factores a estudiar fueron la hora, la longitud del secador, el uso de reflector, ventilación y masa inicial a secar, con dos niveles de estudio cada uno. El diseño propuesto fue un 2^{5-1} en el software de Minitab 16, dando como resultado una serie de 16 experimentos que se desarrollaron en orden aleatorio como lo muestra la Tabla 1. Antes de estudiar los efectos, es imperante realizar un análisis de varianza o ANOVA para validar el efecto de los factores estudiados.

Hora	Longitud	Reflector	Ventilación	Masa inicial (g)	Clave
12 pm	Corto	Con	Sin	110	12CRSH
12 pm	Largo	Con	Sin	55	12LRSI
9 am	Largo	Con	Sin	110	9LRSH
9 am	Largo	Sin	Sin	55	9LSSI
12 pm	Corto	Sin	Sin	55	12CSSI
9 am	Largo	Sin	Con	110	9LSVH
12 pm	Largo	Sin	Sin	110	12LSSH
12 pm	Largo	Sin	Con	55	12LSVI
12 pm	Corto	Sin	Con	110	12CSVH
9 am	Corto	Sin	Con	55	9CSVI
12 pm	Corto	Con	Con	55	12CRVI
12 pm	Largo	Con	Con	110	12LRVH
9 am	Corto	Con	Con	110	9CRVH
9 am	Largo	Con	Con	55	9LRVI
9 am	Corto	Sin	Sin	110	9CSSH
9 am	Corto	Con	Sin	55	9CRSI

Tabla 1 Condiciones de corridas experimentales propuestas por Minitab 16 con su respectiva clave de identificación

Fuente: Elaboración Propia

3. Resultados

3.1 Análisis de los factores que influyen en el secado

La tortilla se adquirió en una tortillería local de la comunidad de Santa María del Monte, Zinacantepec, Estado de México, y se sometió al secado 24 h después de su manufactura. La tortilla utilizada tuvo un contenido de humedad inicial de 0.811 ± 0.03 Kg de agua/Kg ss, con una geometría semicircular de 38 cm^2 , 2 mm de espesor y con una densidad aproximada de 0.95 g/cm^3 .

La tortilla se colocó en los secadores, previamente expuestos por 10 minutos a la radiación solar, y se midió la temperatura en el punto central del secador durante 60 minutos. Después de 60 min de secado, se determinó la humedad final de la tortilla y la velocidad de secado, además, se registró la temperatura promedio de secado y la temperatura más alta durante el secado.

Con el objetivo de delimitar el tiempo para medir la rapidez de secado, se realizó una cinética de secado de la tortilla para observar si el secado fue lineal a lo largo del tiempo. En la Figura 2, se puede observar que la pérdida de agua es lineal en función del tiempo, con una tasa de evaporación de $0.004 \text{ Kg agua/Kg de ss/minuto}$, partiendo de una humedad de $0.81 \text{ Kg agua/Kg ss}$. No encontramos literatura para comparar los resultados obtenidos.

Sin embargo, para el secado de hojas de estevia (Castillo Téllez *et al.*, 2018) existe una tasa de evaporación de $0.05 \text{ Kg agua/Kg de ss/min}$ porque se partió de un producto con humedad inicial del 76 % base húmeda y con un flujo másico de aire de 1355 g/s ; esta diferencia podría indicarnos la importancia de determinar el flujo másico de aire.

Para conocer el tiempo para secar completamente 1 Kg de sólido seco de tortilla bastó con dividir la humedad inicial entre esta tasa de evaporación, para este caso se estimó un secado total en 3 horas y 22 minutos.

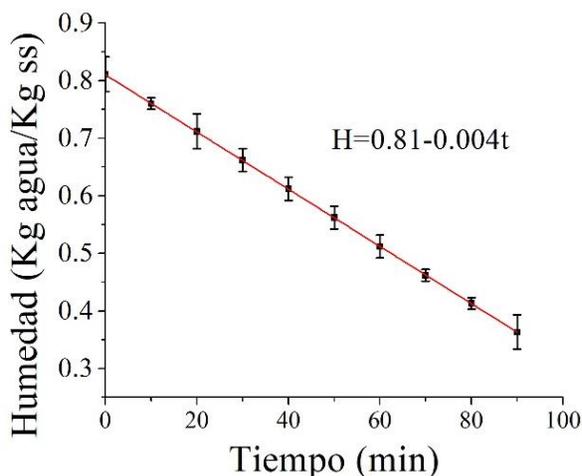


Figura 2 Contenido de humedad de la tortilla sometida al secado a las 12pm en un secador solar corto, sin reflector, sin ventilador utilizando 55 g de tortilla (12CSSI)

Fuente: *Elaboración Propia*

Después de observar que la tasa de evaporación del agua fue lineal, se calculó la velocidad de secado como variable de estudio a partir de la humedad inicial y la humedad final después de 60 min de secado. Se realizó el mayor número de experimentos en la menor cantidad de tiempo posible para evitar variaciones por la cantidad de energía irradiada por el sol y las condiciones ambientales que pueden modificar el secado de la tortilla (Bennamoun & Belhamri, 2006). A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada corrida experimental en la Tabla 2.

Clave	Temperatura de secado promedio (°C)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Velocidad de secado Kg H ₂ O/Kg ss/min
12CRSH	50.6	55.0	0.00485
12LRSI	41.0	45.3	0.00955
9LRSH	38.6	42.4	0.00479
9LSSI	38.2	45.7	0.00528
12CSSI	29.3	37.2	0.00383
9LSVH	38.7	44.9	0.00831
12LSSH	33.9	45.8	0.00378
12LSVI	40.5	41.2	0.00691
12CSVH	37.4	40.6	0.00345
9CSVl	41.4	47.8	0.00754
12CRVI	52.5	56.8	0.00708
12LRVH	50.6	61.3	0.00609
9CRVH	51.7	52.7	0.00312
9LRVI	47.7	50.0	0.00533
9CSSH	28.6	32.1	0.00334
9CRSI	34.7	38.1	0.00458

Tabla 2 Resultados para cada corrida experimental

Fuente: *Elaboración Propia*

En la Tabla 2 se puede observar que la temperatura de secado promedio ronda en los $40 \pm 7^\circ\text{C}$, temperatura semejante a la utilizada por Ferreira *et al.*, (2008), y por Yaldíz & Ertekýn, (2001) con una radiación reportada de 738 W.

Esta temperatura es menor a aquella temperatura alcanzada sin el producto a secar, esto es un indicativo de que realmente está ocurriendo un intercambio de energía, pues el calor del aire está siendo cedido al producto de menor temperatura y también se utiliza para evaporar las moléculas de agua. En la mayoría de los experimentos, se observó que la temperatura de secado durante los primeros 40 min. fue estable y después aumentó.

La temperatura máxima alcanzada fue generalmente 6°C mayor a la temperatura promedio y esta generalmente se alcanzó después de los primeros 40 minutos de secado, esta variación puede considerarse para insertar un sensor que indique cuando se da este cambio dentro del secador y que se pueda saber, por vía remota o por un indicador visual que el producto está en condiciones para ser retirado del secador.

Los valores más altos de temperatura de secado y máxima (52.5 y 61.3°C respectivamente) se alcanzaron con las condiciones 12CRVI y 12LRVH, es decir, al mediodía. Sin embargo, no se recomienda que el secado se realice a temperaturas mayores a 60°C porque los productos a secar pueden sufrir algunas reacciones como de rancidez o pardeamiento (Maskan, 2001), que pudieran ser perjudiciales para los compuestos bioactivos de la tortilla, como lo es el ácido ferúlico (Salinas-Moreno *et al.*, 2007).

Por otro lado, el valor más bajo de temperatura promedio de secado (28.6°C) se obtuvo bajo la condición 9CSSH, es decir, a las 9 de la mañana sin características que favorecieran al secado. La velocidad de secado que expresa la cantidad de agua extraída por sólido dentro del secador, fue mayor para la condición 12LRSI con un valor de 0.00955, mientras que la menor velocidad de secado se obtuvo bajo la condición 9CRVH.

En la Tabla 3, se muestra el resultado de un análisis estadístico de varianza o ANOVA en el que se muestra los valores p para cada variable estudiada en función de cada factor, donde * indica que existe una diferencia estadísticamente significativa $p < 0.05$.

Factores	Variables		
	Valor p de Temperatura promedio	Valor p de temperatura máxima	Valor p de velocidad de secado
Hora	0.395	0.247	0.715
Longitud	0.873	0.512	0.144
Reflector	0.001*	0.02*	0.689
Ventilación	0.005*	0.049*	0.361
Masa Inicial	0.798	0.608	0.158

Tabla 3 Tabla de valores p de ANOVA obtenidos a partir de los datos de Tabla 2

Fuente: *Elaboración Propia*

Los resultados obtenidos demuestran que es muy útil realizar este tipo de análisis estadísticos, ya que a partir de éstos se determinó que sólo los factores como: uso de reflector y ventilación tuvieron un mayor efecto sobre las variables de secado, principalmente sobre la temperatura de secado. Una vez identificados los factores que tuvieron un efecto significativo en la temperatura de secado, se propusieron los modelos matemáticos para determinar la temperatura de secado promedio (Ecuación 3) y máxima (Ecuación 4) en función del reflector y el uso de un ventilador, utilizando el vapor de -1 en caso de ausencia y de +1 en caso de presencia de alguno de los elementos.

$$T_{prom}(^{\circ}C) = 40.9 + 4.96R + 4.1V \quad (3)$$

$$T_{max}(^{\circ}C) = 46 + 4.14R + 3.35V \quad (4)$$

El reflector desvía una mayor cantidad de radiación solar hacia el secador por lo que aumenta la temperatura de secado. Por otro lado, el ventilador puede tener efecto de dos maneras, ya sea distribuyendo mejor el aire caliente dentro del secador logrando un aumento de la temperatura de secado, o bien, aumentando el tiempo de permanencia del aire caliente dentro del secador.

A pesar de que estos dos factores aumentaron la temperatura de secado, no tuvieron efecto sobre la velocidad de secado. Además, no se aprecia que alguno de los factores influyó sobre la velocidad de secado, los valores de p más bajos correspondieron a la longitud del secador y la masa inicial, probablemente se deba a que en un secador de mayor longitud existe una mayor cantidad de aire caliente circundante al producto a secar y por lo tanto se puede secar más cantidad de producto.

La hora a la que se realizó el secado no tuvo mayor impacto en ninguna de las variables estudiadas, contrario a lo que se creería de que el ángulo de radiación del sol tendría un efecto significativo en el secado, no se observó una diferencia significativa en el intervalo entre las 9 de la mañana y el medio día.

Debido a que se redujeron los experimentos para hacer un análisis rápido al sistema de secado planteado, no pudieron estudiarse con validez estadística los efectos sinérgicos, sin embargo, a partir de las medias de datos se obtuvieron las siguientes gráficas de interacción que coinciden con los análisis de factores principales.

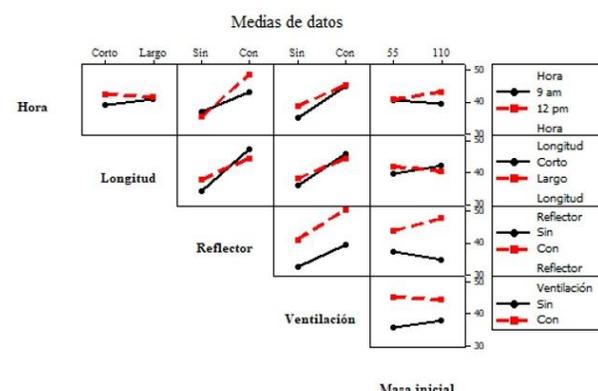


Figura 3 Interacción para temperatura de secado promedio ($^{\circ}C$) elaborada con las medias de los datos

Fuente: *Elaboración Propia*

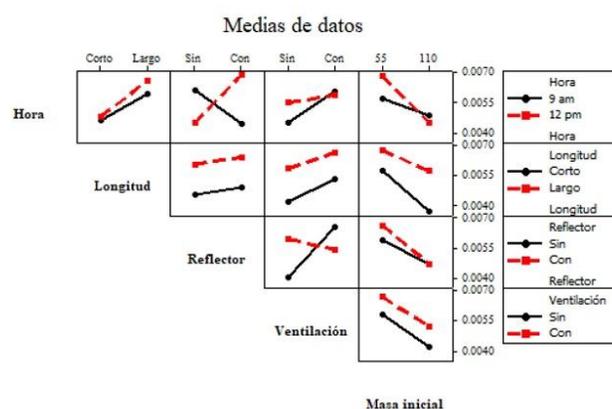


Figura 4 Interacción para velocidad de secado promedio (Kg agua/Kg ss/min) elaborada con las medias de datos

Fuente: *Elaboración Propia*

Las figuras 3 y 4 muestran la interacción entre factores para las variables de respuesta de temperatura promedio y velocidad de secado promedio respectivamente. Si las líneas se sobrepone o están muy cerca una de la otra no hay efecto de una variable sobre la otra.

Si son paralelas alejadas una de otra es un efecto aditivo, es decir, que ambos efectos por separado influyen sobre la variable estudiada. Y si se encuentran cruzadas se puede tratar de un efecto antagónico, así por ejemplo las gráficas de interacción Reflector-Hora se puede deducir que es mejor utilizar el reflector cuando el secado es a las 12 pm y evitarlo cuando el secado es a las 9 am.

Finalmente, en la Figura 4 es posible notar una tendencia en la disminución de la velocidad de secado cuando se aumenta la masa inicial del producto a secar, en contraste, se observa un aumento en la velocidad de secado cuando se utiliza la configuración de tubo largo, donde la relación área irradiada/volumen es menor. Debido a que este proceso depende mucho del área irradiada, es conveniente estudiar el efecto de la geometría y su área irradiada sobre la velocidad de secado. Estos experimentos no reflejan cómo una mayor área irradiada mejora la velocidad de secado, es importante recordar que la velocidad de secado se modifica por la forma en la que el aire entra en contacto con el producto a secar (Lewicki, 2006).

3.2 Energía útil durante el secado.

La energía útil del secador puede calcularse con la Ecuación 5 utilizada por Fudholi *et al.*, (2015)

$$n = \frac{\dot{m}C(T_0 - T_i)}{A_c G} * 100\% \quad (5)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico de aire que circula a través del secador, que según los cálculos obtenidos puede rondar entre 1 y 3 g de aire/s; C el calor específico del aire (0.718 J/gK), T_0 y T_i son las temperaturas correspondientes al cambio de temperatura del aire cuando entra al secador, A_c es el área que ocupa el secador, por lo que el uso del reflector de aluminio disminuye la energía útil del secado y G es la radiación solar en W/m^2 que se calculó a partir del valor de irradiancia de $6.21 \text{ kWh}/m^2/\text{día}$, lo que da una radiación de $477 \text{ W}/m^2$ superior al promedio de 399 W utilizados por Fudholi *et al.*, (2015) para el secado de chile rojo y menor a los $700 \text{ W}/m^2$ utilizados por Castillo Tellez *et al.*, (2018) para el secado de Stevia. La energía útil se calculó entre el 10 y 60%; los secados a menor temperatura y con el uso del reflector tienen una menor energía útil debido a que el uso de reflector aumenta el área y por lo tanto, disminuye la energía útil durante el secado.

Por otro lado, aquellos experimentos donde se alcanzó una mayor temperatura durante el secado y sin el uso de reflector tienen un porcentaje de eficiencia de energía mayor. Conociendo la cantidad de agua evaporada es posible calcular el consumo específico de energía (CEE) con la Ecuación 6:

$$CEE = \frac{P_t}{W} \quad (6)$$

Donde P_t es la potencia utilizada del secador durante el tiempo de secado y W es la masa de agua evaporada del producto. Este valor hace referencia a la potencia utilizada para evaporar un kilogramo de agua, es decir, un menor valor de CEE indica que se necesita menos energía para evaporar el agua. Cabe destacar que para el cálculo de CEE influyen tanto el cambio de temperatura como la velocidad de secado, así, mientras mayor sea la velocidad de secado a menor temperatura significa que CEE es menor y por lo tanto es energéticamente más eficiente.

El análisis energético es muy útil para entender cómo se utiliza la energía radiante del sol, sin embargo, no se relaciona con una de las variables más útiles para el proceso de secado como lo es la velocidad de secado. Sin embargo, en la Figura 5 se presenta una regresión lineal entre la velocidad de secado y el CEE en la cual se observa que no existe una relación entre estas variables. Esto se debe a que para el presente secador, se puede deshidratar con eficiencia energética disminuyendo el área ocupada por el secador, pero como se observó anteriormente, la velocidad de secado es menor. Esta baja correlación se debe a que las variables utilizadas modificaron bruscamente la CEE calculada, sobre todo por el uso de los semiconos refractantes.

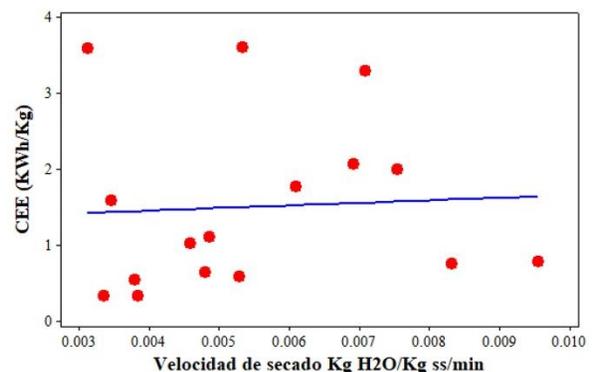


Figura 5 Regresión lineal entre la velocidad de secado y el consumo de energía específica.

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Mecanismo de secado

En la Figura 6 se muestra una regresión lineal entre la temperatura y la velocidad de secado promedio donde se observa que aunque existe una cierta tendencia a incrementar la velocidad de secado al aumentar la temperatura, los resultados de velocidad de secado mayores se consiguieron utilizando temperatura próximas a 40 °C, por lo que este hallazgo puede considerarse para estudios posteriores.

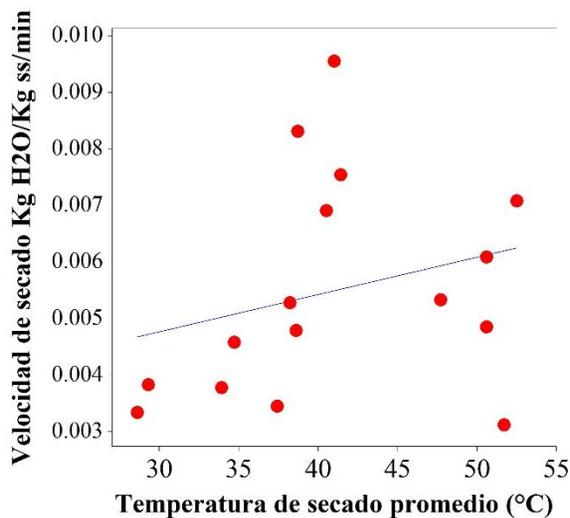


Figura 6 Regresión lineal entre la temperatura de secado promedio y la velocidad de secado experimental
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 6, los puntos ubicados en los valores correspondientes a una mayor velocidad de secado tienen en común que se obtuvieron en el secador identificado como largo, por lo que se sugiere que debería seguirse estudiando la relación área/volumen. Además, Sanghi *et al.*, (2018) menciona que una temperatura de secado más alta aumenta la saturación de la humedad en el secador, por lo que podría disminuir la capacidad de retirar el agua del producto, es por ello que no existe una relación directamente proporcional entre la temperatura y la velocidad de secado.

Para conocer por qué la relación temperatura y velocidad no están directamente relacionados, se determinó la temperatura en varios puntos del secador para observar los gradientes de temperatura. En la Figura 7 se muestra la distribución de temperaturas dentro del secador en un corte transversal.

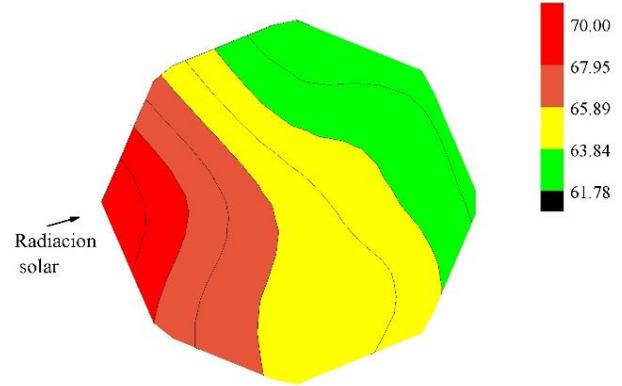


Figura 7 Distribución de temperaturas dentro del secador a las 10 am en corte transversal
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 7 se aprecia que una de las condiciones que favorece al secado es el gradiente de temperatura entre la zona más irradiada por el sol y la zona no irradiada. Este gradiente provoca que en la zona más caliente el aire asciende verticalmente, mientras que en la más fría desciende creando un patrón de recirculación como el modelo propuesto por Sanghi *et al.*, (2018).

Esto explica por qué la temperatura de secado no está estrechamente relacionada con la velocidad de secado, y por qué a las 9 de la mañana se obtuvo un secado tan eficiente como al medio día (12 h) a pesar de que al medio día existe una mayor cantidad de radiación solar. Además ofrece un panorama para modificar la posición del producto a secar, ya que según las predicciones de Singh *et al.*, (2015) el secado puede ser mayor a una mayor altura del producto a secar, pero con la desventaja que la velocidad del aire es menor.

4. Conclusiones

Las mejores condiciones para el secado de tortilla en un secador solar cilíndrico vertical se obtuvieron cuando se utilizó el reflector, el ventilador, la configuración de secador largo; además se encontró que, a menor cantidad de material a secar, la velocidad de secado fue mayor independientemente de la hora a la que se efectuó el secado. A partir de este trabajo pueden elaborarse programas virtuales que simulen la operación del secador bajo las condiciones estudiadas, además, para mejorar la eficiencia del secado, se propone el uso de materiales o membranas que absorban la humedad dentro del secador, para que el aire que recircula hacia el producto tenga menor contenido de agua.

5. Referencias

- Bennamoun, L., & Belhamri, A. (2006). Numerical simulation of drying under variable external conditions: application to solar drying of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 76(2), 179-187.
- Boxwell, M. (2016). Solar Electricity Handbook. Greenstream Publishing Sitio web: <http://www.solarelectricityhandbook.com/free-solar-book.html>. Consulta: 28 de junio de 2018
- Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., Castillo-Téllez, B., López-Vidaña, E.C., & López-Ortiz, A. (2018). Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy*, 159(June 2017), 898-907.
- El-Sebaili, A.A., & Shalaby, S.M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37-43.
- Ferreira, A.G., Maia, C.B., Cortez, M.F.B., & Valle, R.M. (2008). Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, 82(3), 198-205.
- Fudholi, A., Sopian, K., Alghoul, M.A., Ruslan, M.H., & Othman, M.Y. (2015). Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds. *Renewable Energy*, 78, 561-565.
- Lewicki, P.P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science and Technology*, 17(4), 153-163.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177-182.
- Moreira, R.G., Sun, X., & Chen, Y. (1995). Factors Affecting Oil Uptake in Tortilla Chips in Deep-fat Frying. *Journal of Food Engineering*, 8774(96), 485-498.
- Pangavhane, D.R., & Sawhney, R.L. (2002). Review of research and development work on solar dryers for grape drying. *Energy Conversion and Management*, 43(1), 45-61.
- Rahmani, M., Kaykhai, M., & Sasani, M. (2018). Application of Taguchi L16 design method for comparative study of ability of 3A zeolite in removal of Rhodamine B and Malachite green from environmental water samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 188, 164-169.
- Salinas-Moreno, Y., López-Reynoso, J. de J., González-Flores, G.B., & Vázquez-Carrillo, G. (2007). Compuestos fenólicos del grano de maíz y su relación con el oscurecimiento de masa y tortilla. *Agrociencia*, 41(3), 295-305.
- Sanghi, A., Ambrose, R.P.K., & Maier, D. (2018). CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. *Drying Technology*, 36(7), 859-870.
- Singh Chauhan, P., Kumar, A., & Tekasakul, P. (2015). Applications of software in solar drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1326-1337.
- Sodha, M.S., & Chandra, R. (1994). Solar drying systems and their testing procedures: A review. *Energy Conversion and Management*, 35(3), 219-267.
- Vijayavenkataraman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670.
- Yaldyz, O., & Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3-4), 583-597.