

DESHIDRATACIÓN DE REBANADAS DE CEBOLLA EN SECADOR CON DESHUMIDICACIÓN DE AIRE BASADA EN SÍLICA GEL

ONION SLICES DEHYDRATION IN A DRYER WITH AIR DEHUMIDIFICATION BASED ON SILICA GEL

Federico Hahn*; José Manuel Vargas Sállago

**Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5,
Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.
Correo-e: fhahn@correo.chapingo.mx (*Autor responsable)**

RESUMEN

Se construyó un túnel de secado solar con recirculación de aire a través de un sistema auxiliar desecante de sílica gel para adsorber la humedad. La cebolla fue cortada en rebanadas y deshidratada dentro de un túnel que utilizó energía solar como medio de secado. Basado en resultados empíricos previos, se aplicó una regeneración térmica al sistema auxiliar de sílica para desprender la humedad, por 15 minutos cada hora. La humedad relativa y la temperatura fueron monitoreadas durante todo el proceso. Se compararon los resultados obtenidos con los de un sistema de secador solar simple sin sistema auxiliar de sílica gel. Considerando su operación práctica independiente de condiciones iniciales, con sistema auxiliar desecante secó la cebolla en 11.1 horas, mientras que el túnel solar sin sistema auxiliar desecante requirió de 16.3 horas. Se analizó el color de la cebolla usando los valores RGB (rojo, verde y azul) en ambos tratamientos y el mejor producto se obtuvo con el secador con sistema auxiliar desecante, con tiempos menores de secado y menor exposición a temperatura alta cuando la cantidad de agua era poca. La oxidación de la cebolla ocurrió cuando el valor del color azul fue menor a 100.

Palabras clave adicionales: deshumidificación, secado solar, análisis RGB, oxidación, cebolla.

ABSTRACT

A drying solar tunnel was built with an auxiliary desiccant air recirculation system based on silica gel to adsorb moisture. Onion was cut in slices and dried inside the solar tunnel. Based on empirical data previously obtained, every fifteen minutes per hour, heat regeneration was applied to the auxiliary desiccant system to eliminate the moisture from the silica. Temperature and relative humidity were monitored during the process and drying data were compared with those of a drier that operated without the auxiliary desiccation system. In practical operation without considering initial conditions, the equipment with desiccant system dried the onion slices in 11.1 hours meanwhile the solar tunnel without the auxiliary system required 16.3 hours. A RGB (red green blue) color analysis was carried out for both drying treatments and a better quality was achieved on onions dried with the air-desiccant strategy, as the time exposed to high temperatures under low water quantity was reduced. Onion oxidation was evident when the blue value fell below 100.

Additional key words: dehumidifying, solar dehydration, RGB color analysis, onion oxidation.

INTRODUCCIÓN

En el caso de frutas en general, el valor agregado que le aporta el secado es cercano al 30 %, por lo que el costo del proceso juega un papel fundamental (FAO, 1989; Reusse, 2002). Se hace imprescindible, disponer de una tecnología que permita reducir los costos de operación si se requiere obtener una ganancia neta aceptable. El proceso de secado consiste esencialmente en evaporar la mayor parte del agua almacenada de manera natural en un producto. La deshidratación con energía solar constituye una de las formas más económicas de secado, ya que utiliza la fuente más barata de energía que es el sol, obteniendo un producto de alta calidad, el cual retiene las propiedades físicas, el sabor y las vitaminas A y C, pues la operación se realiza a temperaturas moderadas (Rapusas y Driscoll, 1995; Adam *et al.*, 2000; Kaymak-Ertekin y Gedik, 2005).

Existen numerosos métodos de secado que difieren entre sí, siendo dependientes de la transferencia de calor y masa. Normalmente se aplica calor al producto, seguido por la extracción de humedad del mismo. La velocidad de secado depende de las condiciones (temperatura de bulbo seco, humedad relativa del aire, superficie de secado y temperatura en la superficie del producto). Largos tiempos de secado reducen la calidad de los productos debido a las reacciones enzimáticas, pungencia, degradación en pigmentos y oxidación del ácido ascórbico. La cebolla seca de alta calidad debe ser de color blanco, rápidamente rehidratable, sin cargas microbiológicas y de alta naturaleza picante (Saimbhi *et al.*, 1970). El cambio de color en la cebolla es causado por la alta temperatura y la cantidad de agua presente en el producto secado (Pezzutti y Crapiste, 1997). Por otro lado, a medida que el contenido de agua de la muestra disminuye aumenta la oxidación.

La mayoría de los elementos químicos que dan el sabor y aroma a la cebolla, conocidos como precursores, son el resultado de reacciones entre enzimas y sustratos que se mantienen separados dentro del tejido (Elustondo *et al.*, 1996). Al cortarse la cebolla estos precursores reaccionan manteniéndose en cantidades considerables.

Agarry *et al.* (2006) comparó el secado de muestras de cebolla de 50 g puestas en una plancha directamente al sol, en un secador solar y en un secador con aire caliente. Este último resultó ser 20 veces más rápido que el de secado directo al sol y 16 veces más rápido que el secado solar. La mayor velocidad de secado se obtuvo a 80 °C y el tiempo de secado aumentó con el tamaño de las muestras de cebolla.

La deshidratación por convección en túneles presenta baja eficiencia energética y afecta la calidad final del producto (Laguerre *et al.*, 1999; Markowski y Zielonka, 1996). Por su parte, el secado infrarrojo presenta una mayor eficiencia energética y una mayor transferencia de calor (Macaluso, 2001; Wang, 2002). Sandu (1986) reportó que el aire recirculante en un secador infrarrojo catalítico aumenta el tiempo de secado. Gabel *et al.* (2006) reportaron que para obtener una cebolla deshidratada blanca es necesario trabajar a 70 °C, y de ser posible un pequeño

tiempo a 80 °C al inicio para evitar la pérdida de la naturaleza picante y un decremento en la población microbiológica.

Los materiales desecantes como la sílica gel son sólidos que adsorben humedad sin cambios físicos y químicos (Davanagere *et al.*, 1999). La sílica gel compuesta de 97 % sílica y 3 % alúmina; contiene numerosos poros y capilares en donde se condensa el agua, adsorbiendo la humedad y soltándola al ser sometida a altas temperaturas posteriormente. Su largo tiempo de vida, sus propiedades, ser inerte y no-tóxica y su optimización energética la hacen muy atractiva en los secadores.

Madhiyanon *et al.* (2007) acoplaron una rueda con sílica gel desecante a un secador de aire caliente para deshidratar coco. El color final del coco no varió y el tiempo de secado se redujo en un 77 %. Riyad y Jacques (2001) introdujeron sílica desecante a un secador solar reduciendo el tiempo de secado de chabacanos de 55 a 44 h Khouzam (2009) desarrolló un secador solar desecante para secar semillas y granos y utilizó una solución líquida desecante con cloruro de litio concentrado al 75 %. La humedad relativa disminuyó en un 10 % independiente de la condición ambiental. La solución desecante fue calentada a 45 °C mediante energía solar, y proporcionó un ahorro del 25 % en el tiempo de secado. La calidad del producto final fue muy buena ya que se evitaron aplicaciones intensivas de calor.

Este trabajo presenta un equipo automático desecante para la deshidratación de la cebolla. Se trata de un secador solar en túnel adaptado con un aditamento auxiliar de deshumidificación basado en sílica gel. La operación de este sistema se comparó con la de un secado solar carente del aditamento auxiliar mencionado, considerando el color final de la cebolla resultante de su oxidación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del equipo. Un túnel de 3 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de altura fue construido para secar cebolla en el Departamento de Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo. El sistema de secado se basó en la recirculación de aire húmedo del interior del túnel a través de un filtro desecante que contenía sílica gel (Figura 1). La Figura 2 muestra el diagrama total del sistema, donde la válvula 7 da paso al aire proveniente del túnel de secado, circulando de forma continua por el filtro desecante (1) y el extractor (2), retornando, una vez seco, por la válvula 4. Las válvulas 8 y 3 operan en sincronía durante el proceso de regeneración, dejando la primera pasar el aire caliente proveniente del calefactor (9), mientras la segunda expulsa el aire húmedo resultante. Después de ser secado, el aire pasa hacia la tubería barrenada (5) que tiene la función de distribuir la corriente de fluido a lo largo del túnel de secado lo más uniformemente posible. Los ductos (6) son el acceso del aire húmedo del túnel.

El filtro que contiene la unidad desecante fue desarrollado usando un par de láminas con 500 agujeros cada una para evitar pérdidas de fricción durante el paso del aire (Figura 3). El filtro

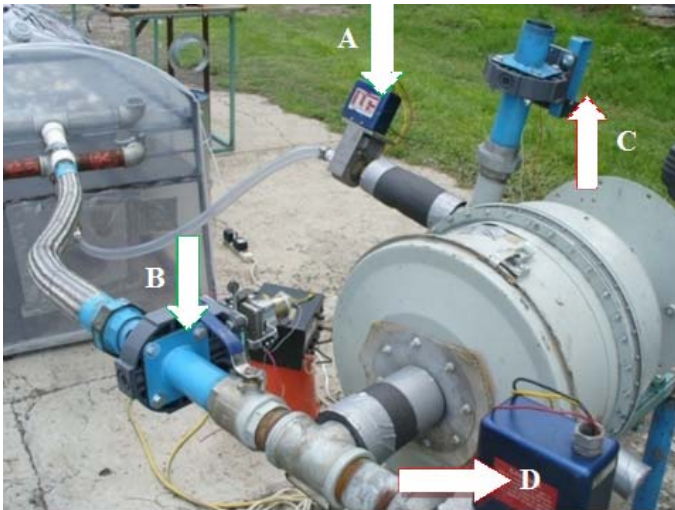


Figura 1. Túnel, filtro y electroválvulas, siendo aquellas con flecha (A y B) son las que operaron en la recirculación del aire a partir del túnel de secado y las señaladas como (C y D) las de regeneración.



Figura 3. Ubicación del filtro desecante y del sensor de humedad antes de la electroválvula de recirculación.

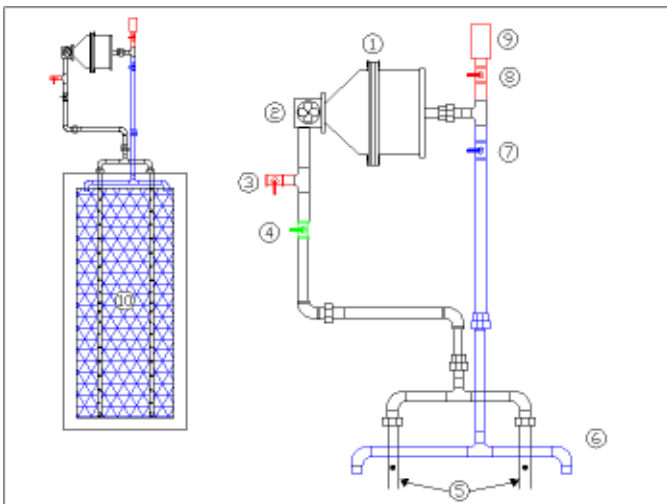


Figura 2. Disposición del sistema de secado con regeneración compuesto por (1) filtro desecante (2) extractor, (3) válvula que expulsa aire húmedo, (4) válvula de regreso al túnel, (5) tubería para regresar el aire al túnel, (6) tubería de succión (7) válvula de paso a la salida del túnel, (8) válvula que permite el ingreso de aire caliente, (9) calentador.

presentaba doce divisores de flujo para hacer uniforme el paso del aire por la rueda de 45.7 cm de diámetro y 3.8 cm de espesor.

Se construyó un circuito electrónico para controlar las cuatro válvulas electromecánicas que son las encargadas de direccionar el flujo de aire. Se empleó, para el control, el microcontrolador AT89C51 y cuatro relevadores para manejar el voltaje de operación de las válvulas. La señal para el control de los relevadores se manda por el puerto 1 del microcontrolador. Básicamente, el programa consistió en abrir y cerrar las válvulas

según el diagrama de tiempos (Figura 4). Las válvulas 4 y 7 se abren por una hora, tiempo que trabaja el filtro desecante adsorbiendo la humedad. Por otro lado, las válvulas 3 y 8 se abren durante el periodo en que se regenera la sílica gel y se conecta la resistencia eléctrica (9).

Pruebas de regeneración de la sílica gel. Un proceso importante en la operación del sistema de secado lo constituye la regeneración del material desecante (sílica gel, con diámetro de 3.17 mm). El diseño del calentador para el proceso de regeneración requiere de varias pruebas a diferentes temperaturas para determinar los valores óptimos de temperatura y tiempo de exposición para la regeneración de la sílica. El procedimiento seguido fue el siguiente: (1) se prepararon veinte muestras de 150 g de sílica humedecida; (2) a cada muestra de sílica se le

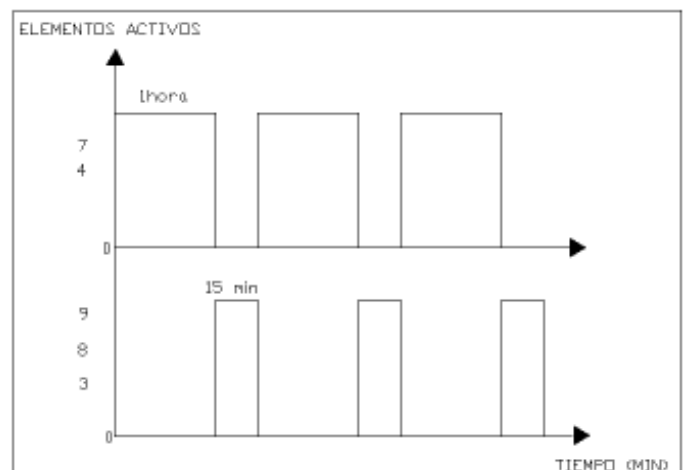


Figura 4. Diagrama de tiempos de los sistema de deshidratación y de regeneración.

aplicó una temperatura diferente por un tiempo de secado dado y (3) después de cada tratamiento se tomó la masa residual para su posterior análisis.

El sistema de regeneración para el secado automático de la sílica utilizó una resistencia de 2000 W enrollada dentro de un tubo de acero inoxidable. Se adaptó incorporando tapas metálicas con 17 barrenos de 6.35 mm de diámetro para obtener los 100 °C requeridos por el sistema de regeneración durante el secado. Para evitar pérdidas de calor y con ello hacer eficiente el uso de la energía eléctrica, se encapsuló la resistencia dentro de un chasis metálico acoplado al tubo de 5 cm que dirige el caudal hacia el sistema si la válvula de obstrucción está en posición de paso.

Pruebas de secador con cebolla. Se cortó cebolla en pequeños trozos rectangulares con medidas promedio de 4x2 cm. El grosor de las muestras fue aleatorio ya que los cortes no eran uniformes, además de que el grosor de las capas de la cebolla eran variables. Durante las pruebas de secado, se pesaron muestras de cebolla cada hora y se registraron los valores de temperatura y humedad relativa a la entrada de aire al sistema de secado y en la salida del mismo antes de pasar a la recirculación. Entre las 10:00 y las 18:00 horas se presentó radiación solar considerable, lo cual ocurrió durante los cinco días muestreados; en todos los días el cielo estaba libre de nubes. Al empezar cada prueba de secado y al finalizar el mismo se fotografiaron las muestras y se analizó el cambio de coloración durante el secado, mediante valores de rojo, verde y azul (R, G, B, respectivamente). La intensidad luminosa varió a lo largo del día y por ello fue necesario compensar cada toma realizada con la cámara. En tres diferentes secciones dentro del túnel se fijaron cuadros de acrílico blanco. Los valores obtenidos por cada color (verde, rojo o azul) en el producto fueron divididos entre el valor obtenido por el color verde, rojo o azul en el acrílico. Estos porcentajes se compararon entre ellos y el valor promedio, multiplicado por el valor de 256, dio la intensidad final.

La eficacia del secador con regeneración de aire se obtuvo al compararlo con un túnel idéntico sin el filtro desecante y que utilizó un extractor para desalojar el aire húmedo del túnel. En esta modalidad no hubo recirculación, sino sólo intercambio de

aire húmedo por aire atmosférico a las condiciones ambientales de temperatura y humedad (Figura 5a).

Con la finalidad de conocer la variación de los parámetros dentro del túnel se monitorearon la temperatura y humedad relativa (HR) a lo largo del túnel, teniendo cuatro puntos de medición repartidos uniformemente a lo largo del domo, en la parte más elevada del mismo (Figura 5b). Para la colección de los datos se emplearon dos registradores (LabPro, Vernier, USA) y un sensor de radiación solar externo cerca del túnel de secado. La temperatura y humedad relativa fueron monitoreadas al entrar y salir el aire al filtro desecante. Las mediciones se llevaron a cabo con sensores de humedad (modelo TRH-300, RIXEN) con salida de corriente 4-20 mA. Los sensores fueron calibrados a 33 y 75 % HR con soluciones de calibración (EXTECH, modelos RHA-33 y RHA-75). La exactitud del sensor de humedad relativa fue de $\pm 2\%$, estuvo compensado térmicamente y su tiempo de respuesta era menor a 15s. La temperatura fue adquirida por un RTD Pt 100 con una precisión de $\pm 0.12\%$. Un total de cinco pruebas de secado se realizaron con el sistema desecante y otras cinco pruebas con el sistema solar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Operación del secador

Con la finalidad de llevar a cabo la automatización del sistema fue necesario saber el tiempo óptimo para la regeneración de la sílica gel, así como la temperatura ideal para llevar a cabo tal procedimiento. La Figura 6 muestra los diferentes tratamientos de secado realizados a las muestras de sílica previamente hidratadas. La mayor tasa de eliminación de agua de la sílica gel se presentó al exponerla por 20 min dentro del rango de temperatura de 100 a 105 °C. Temperaturas menores mostraron el proceso de regeneración, mientras que temperaturas mayores ya no mostraron un incremento notable en la disminución del tiempo de secado del material desecante. En el túnel se empleó una temperatura de regeneración de 100 °C aplicada por un lapso de 15 min, para así ganar tiempo y aprovechar de mejor manera las horas de radiación solar durante el día. La respuesta térmica del calentador eléctrico



Figura 5. Secador sin retroalimentación (izquierda) y con retroalimentación (derecha) muestreado en diversas zonas.

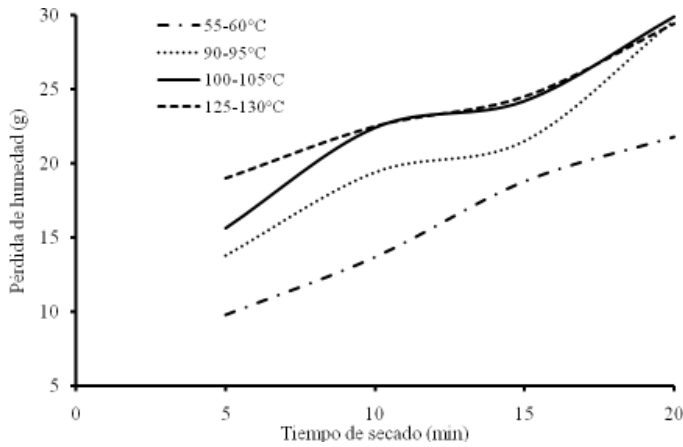


Figura 6. Pérdida de humedad de la sílica ante diferentes temperaturas buscando las condiciones óptimas de regeneración.

varió ± 3 °C. El aire no se enfrió al pasar por el filtro desecante, ganando 3 °C y perdiendo 30 % en humedad relativa.

Secado de la cebolla con secador desecante y con secador solar

La prueba de secado de la cebolla con el sistema desecante regenerativo requirió de un total de 11.1 h para reducir el peso inicial del producto al 11.5 % (Figura 7). La humedad relativa interna del túnel con el filtro desecante ya funcionando fue de 28 a 31 % a la una de la tarde durante los cinco experimentos y se escogieron días sin nubes. Los datos climatológicos (en especial temperatura, humedad relativa y radiación) fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo. Se apreció que después de las 17:30 horas la radiación bajaba a $100 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ y la temperatura dentro del túnel bajaba a 36 °C, lo cual no permitió un secado rápido. A las 10:00 horas se tuvo una radiación superior a $700 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ y la temperatura en ascenso superó los 33 °C iniciando con el proceso de secado. Estas características fueron únicamente reales cuando las condiciones climatológicas fueron las adecuadas y circulaba poco viento. El peso final correspondió al 11.5 % del peso inicial,

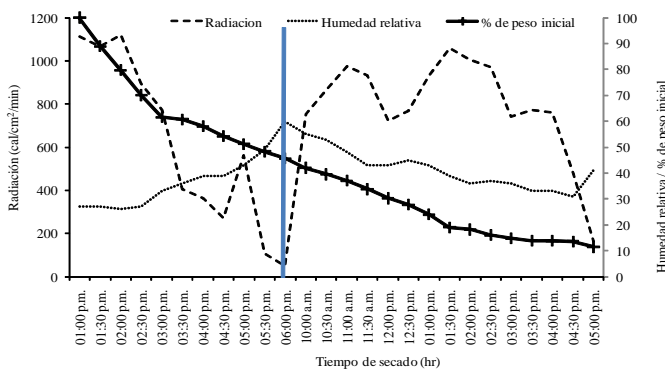


Figura 7. Condiciones climáticas prevalcientes en los días 31 de julio y 1ero de agosto y pérdida de peso de las rodajas de cebolla con el secador desecante. La línea vertical muestra la división entre los dos días.

garantizando suficiente humedad en el producto y evitando daños mecánicos durante el transporte. La temperatura máxima obtenida en el túnel se obtuvo a las 13:00 horas, promediando un valor de 49 °C.

Durante la operación del proceso de regeneración existieron intervalos en los que se perdió humedad por efecto de evaporación al estar el producto dentro del secador. El tiempo de secado puede reducirse si el aire dentro del túnel estuviera más caliente o bien reduciendo el volumen de aire dentro del secador. No obstante, esto requeriría de un control de la temperatura ya que ocasionaría una disminución en la calidad del producto final. En la noche la cebolla no pierde peso, pero cuando su espesor es muy delgado cambia su colorido. A pesar de bajar la temperatura en la noche el diferencial de temperatura entre el interior del túnel y el aire externo se incrementó y la humedad aumentó en la madrugada. En tres experimentos con el secador solar se arrancaron los extractores a las 4:00, 5:00 y 6:00 horas por 3 min, evitando que la condensación afectara al producto.

El secador solar que extraía aire húmedo sin recirculación requirió de 16.3 horas para reducir el peso inicial al 11.5 % (Figura 8). En los cinco experimentos se comenzó la prueba a las 13:30 horas. La humedad relativa dentro del túnel varió entre 45 y 47 % para el momento inicial y en ningún experimento se apreciaron nubes. La pendiente con que disminuyó la humedad de la cebolla fue continua, ajustándose a la forma de una función exponencial. No obstante, a partir de la décima hora empezó a ser más difícil su deshidratación. La temperatura máxima dentro del túnel fue de 65 °C, que representó una diferencia de 15 °C por encima de la temperatura experimentada en el secador desecante. El período en el que la temperatura fue superior a los 50 °C fue de 2.5 h y en el resto del tiempo se comportó de manera similar al secador desecante. No obstante, la temperatura de 65 °C, en el tercer día, cuando la cebolla había perdido el 70 % del agua, tostó las rebanadas de cebolla (Figura 9). El aplicar 50 °C permitiría conservar la coloración inicial de la cebolla.

En un estudio similar, Echazú *et al.* (2007) reportaron un tiempo de secado de 18 h. Las cebollas eran cortadas y colocadas

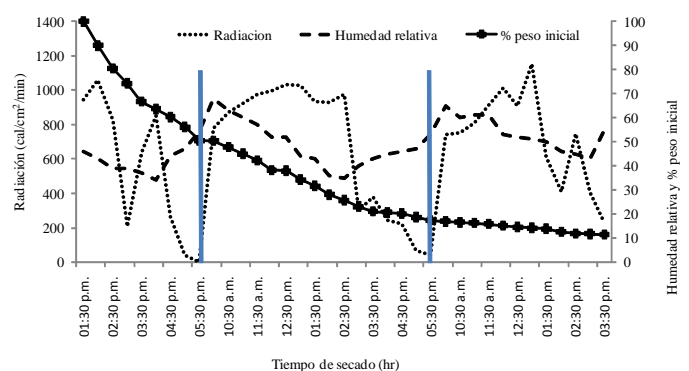


Figura 8. Condiciones climáticas prevalcientes en los días 4, 5 y 6 de agosto y pérdida de peso de las muestras de cebolla durante el secado solar. Las líneas verticales muestran el término de las mediciones en cada día.



Figura 9. Deshidratación de la cebolla después de (a) 1 hora, (b) 3 horas, (c) al final del secado con el sistema desecante y (d) al final del secado solar sin sílica gel.

en charolas con una densidad de $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. La temperatura del aire proveniente de los colectores que ingresó a la cámara supera los $40 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 6 h diarias o más y la velocidad de movimiento del aire era de $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elustondo *et al.* (1997) propusieron un modelo para secar cebolla cortada en cuadros de 1.5 mm de grosor en 200 min, usando aire caliente a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ desplazado a $4.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Evaluación del color de las muestras en ambos prototipos

El Cuadro 1 muestra la variación de color rojo, verde y azul de acuerdo al grosor inicial de las muestras en dos momentos: al inicio y al final del secado. La intensidad inicial del verde y rojo fue igual para todas las muestras arriba de 4 mm de grueso. Estas intensidades (verde y rojo) variaron después de 10 h tendiendo a mantenerse similares en las muestras de 4 y 6 mm de grosor. Las muestras delgadas presentaron las menores intensidades de R, G y B desde el principio hasta el final del secado. El número de muestras de 2 mm de grosor fue menor, por lo que la desviación estándar tendió a incrementarse. Los valores de intensidad G y B presentaron desviaciones estándar del orden de 3 una vez que se deshidrató el producto. La desviación estándar fue superior en las muestras finales, las cuales no presentaron una coloración

constante a lo largo de toda su superficie. Kasim (2009) introdujo las cebollas cortadas en un tratamiento con agua por 2 min buscando eliminar las reacciones oxidantes, pero los resultantes no fueron del todo favorables.

El Cuadro 2 muestra el efecto en la coloración causado por el secador solar. Todas las muestras de 2 o 3 mm de grosor presentaron valores de azul (B) menores a 100, lo cual se aceptó que provenía de una oxidación, ocasionando un tostado oscuro del producto. Del total de muestras, el 80 % sufrieron problemas de reacciones enzimáticas, las cuales se aprecian cuando el valor de azul es menor a 145. La poca oxidación produce mediciones de azul cercanos a 140, lo cual se apreció en muestras de 6 mm de grueso. La forma de corte afectó de manera importante la coloración, siendo los menos afectados los cortes rectangulares y los más afectados ($90 < B < 110$) los triangulares. Asimismo, en ambos secadores se apreció que los cortes triangulares fueron los primeros en enrollarse. Los valores de R, G, y B en la cebolla deshidratada por el sistema solar presentaron una amplia variación de valores, ya que el sistema operó muy lentamente. Se obtuvo una variación estándar de 4.2 debido a la gran

Cuadro 1. Efecto del grosor en el color RGB de las muestras deshidratadas de cebolla en el sistema con secado desecante de aire.

Grosor (mm)	Deshidratado inicial			Deshidratado final		
	R Media/STD	G Media/STD	B Media/STD	R Media/STD	G Media/STD	B Media/STD
2	128/1.6	137/1.7	177/1.8	163/2.8	162/3.1	169/2.9
4	144/1.3	165/1.1	195/1.2	171/1.9	174/1.7	182/1.5
6	155/1.1	165/1.2	193/1.12	169/1.6	175/1.5	186/1.6

STD: Desviación estándar.

Cuadro 2. Efecto del grosor en el color RGB de las muestras deshidratadas de cebolla en el sistema con secado solar.

Grosor (mm)	Deshidratado inicial			Deshidratado final		
	R Media/STD	G Media/STD	B Media/STD	R Media/STD	G Media/STD	B Media/STD
2	127/1.4	139/1.6	181/1.5	148/3.8	155/3.9	86/4.2
4	141/1.9	166/1.3	192/1.4	158/2.8	160/2.1	135/3.5
6	157/1.2	164/1.3	197/1.1	166/2.9	157/3.1	133/3.6

STD: Desviación estándar.

dispersión de datos de color azul para grosores de 2 mm. Pezzutti y Crapiste (1997) concluyeron que las enzimas que oxidan a las cebollas entran en acción a temperaturas superiores a 60 °C. Hussain *et al.* (2008) reportaron el tiempo de secado solar de una gran cantidad de frutas y verduras en Pakistán y concluyeron que los pedazos de cebolla calentados a 65 °C mostraron un color café después de 6 h de secado, una vez que el 85 % del agua era removida.

La deshidratación de la cebolla en forma continua utiliza un grupo de bandas transportadoras con longitud de 29.4 m, procesando 2,000 kg·h⁻¹ por línea (Rapusas y Driscoll, 2002). El secador presenta tres etapas, la primera trabajando con aire caliente a 89 °C, la segunda a 67 °C y la tercera a 55 °C. La humedad es reducida de 83 a 5 % en 4.5 h, usando velocidades de aire entre 0.4 y 1 m·s⁻¹. La primera etapa de secado reduce la humedad relativa de 83 a 37.3 %, la segunda etapa lo hace de 12.4 % y la tercera a la humedad final de 5 %, antes de que la cebolla seca pueda molerse.

El comportamiento de la sílica gel se aprecia en las Figuras 10 y 11. Se observó que la humedad decreció una vez que se aplicó la regeneración de calor para secar la sílica. La temperatura

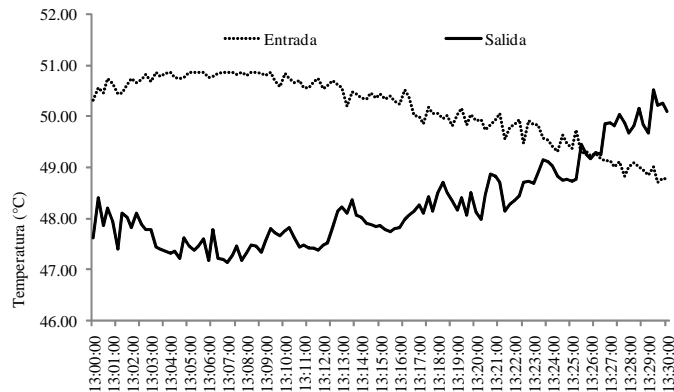


Figura 10. Temperatura del aire proveniente de la sílica gel al túnel (entrada) y a la salida del túnel rumbo al filtro desecante.

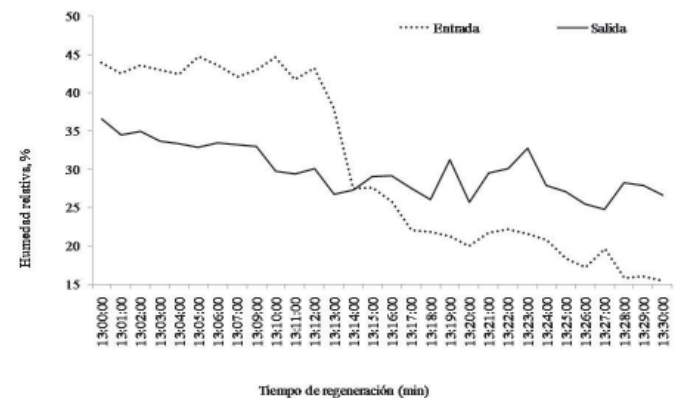


Figura 11. Humedad relativa a la entrada del invernadero después de ser secada por el filtro y humedad succionada hacia el filtro.

proveniente del filtro desecante y la de la entrada al filtro fueron iguales cuando la sílica había perdido la humedad (Figura 10). El aumento de la temperatura de la curva roja y el decremento de la curva azul tienen que ver con la etapa de regeneración de la sílica empezando a las 13:07 horas e incrementándose en 3 °C después de 15 min. La humedad (Figura 11) cae instantáneamente desde 45 a 26 % una vez que se aplica calor y continúa reduciéndose hasta 15 % durante el intervalo de regeneración. La humedad dentro del túnel se mantiene entre 25 y 35 % (línea roja) durante el intervalo, reduciéndose un poco después de la regeneración.

Prueba de uniformidad de secado a lo largo del túnel.

Se compararon los promedios de las señales recibidas de los sensores de humedad relativa y temperatura. Existió una diferencia en temperatura del aire entre el lado opuesto del túnel (donde no se realiza la recirculación) y el de extracción del aire, ya que el aire no se mueve al no presentar turbulencia. En el caso de la temperatura, el sitio más caliente del túnel de secado se ubica en la periferia de la semiesfera, siendo 6.3 % superior al promedio de los cuatro puntos muestreados. La mayor humedad relativa se presentó en la sección donde se extrae el aire para la recirculación (6.64 % por arriba del promedio). El área más seca (9.35 % por debajo del promedio) correspondió al punto más alejado, justo donde se registra la mayor temperatura.

CONCLUSIONES

El secador equipado con sistema de deshumidificación de aire basado en sílica gel permitió menor tiempo de secado que el secador carente de dicho aditamento. El tiempo que tardó en secarse la cebolla con extracción de aire fue de 16.3 horas contra las 11.1 h usando un filtro desecante, lo cual representa una reducción del 32 %.

Aunque hubo tiempos muertos en el deshidratado de los productos durante la regeneración de la sílica por la falta de movimiento del aire, esto se vio compensado con la alta tasa de extracción de humedad en los primeros minutos después de que el filtro desecante se ha secado. El producto deshidratado dentro del micro túnel presentó un cambio de coloración cuando la temperatura aumentaba en muestras ya casi secas. Al no haber tanta humedad en el sistema de recirculación y baja temperatura, la cebolla tendió a mantener el color blanco durante el deshidratado. Con la prueba de uniformidad de secado se observó lo importante que resulta el circular el aire dentro del túnel para homogeneizar las condiciones del secado. En el análisis de color basado en valores de rojo, verde y azul de las muestras secas se vio que la oxidación se presentó cuando el valor del color azul se reduce por debajo de 100. Al comparar ambos sistemas de secado, el producto que presentó menor oxidación fue el del filtro desecante. Los pedazos en forma triangular se secaron más rápidamente y aquellas muestras de poco grosor fueron las que peor calidad final obtuvieron.

LITERATURA CITADA

- Adam E.; Mühlbauer W.; Esper A.; Wolf W.; Spiess W. 2000. Quality changes of onion (*Allium Cepa* L.) as affected by the drying process. *Food* 44(1): 32-37.
- Agarry S. E.; Yusuf R. O.; Owabor C. N. 2006. Studies of air-dry processing of onions. *Journal Food Technology* 4(4): 357-361.
- Davanagere B. S.; Sherif S. A.; Goswami D. Y. 1999. A feasibility study of a solar desiccant air conditioning system Part I: Psychometrics and analysis of the conditioned zone. *International Journal of Energy Research* 23: 7-21.
- Echazú R.; Condorí M.; Durán G.; Saravia L. 2007. Curvas de secado experimentales en la planta de deshidratado solar de Huacalera. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11: 02.09-02.16.
- Elustondo M. P.; Pelegrina A. H.; Urbicain M. J. 1996. A model for the dehydration rate of onions. *Journal Food Engineering* 29: 375-86.
- Elustondo M. P.; Urbicain J. J.; Pelegrina A. H. 1997. Onion dehydration: A model to calculate drying rate. *Acta Horticulturae* 433: 561: 566.
- FAO. 1989. Prevention of Post-Harvest Food Losses Fruits, Vegetables and Root Crops. A Training Manual. Food & Agriculture Organization, Rome.
- Gabel M. M.; Pan Z; Amaratunga K. S.; Harris L. J.; Thompson J. F. 2006. Catalytic infrared dehydration of onions. *Journal of Food Science* 71: E351-E357.
- Hussain M. Y.; Islam-ud-Din; Anwar M. 2008. Dehydration of agricultural products by mixed mode solar dehydrator. *International Journal of Agriculture and Biology* 10: 333-336.
- Kasim R. 2009. The effects of cut-type and heat treatment on fresh-cut green onions quality. *American-Eurasian Journal Agriculture and Environmental Science* 5(3): 428-433.
- Kaymak-Ertekin F.; Gedik A. 2005. Kinetic modeling of quality deterioration in onions during drying and storage. *Journal of Food Engineering* 68(4): 443-453.
- Khouzam K. 2009. Development of a desiccant solar drying system for agricultural products. Publication No. 09/026. Rural Industries Research and Development Corporation. Canberra, Australia.
- Laguerre J. C.; Tauzin V.; Grenier E. 1999. Hot air and microwave drying of onions: a comparative study. *Drying Technology* 17: 1471-80.
- Macaluso V. 2001. Infrared drying technology applications. *Cereal Foods World* 46: 355-356.
- Madhiyanon T.; Adirekrut S.; Sathitruangsak P; Soponronnarit S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Journal Chemical Engineering and Processing* 46: 282-290.
- Markowski M; Zielonka G. 1996. Heat transfer coefficient during the air drying of onions. *Polish Journal Food Nutrition Science* 5(4): 97-104.
- Pezzutti A.; Crapiste G. H. 1997. Color changes during dehydration of onion (*Allium Cepa* L.) and garlic (*Allium Sativum* L.). *Acta Horticulturae* 433: 455-462.
- Rapusas R. S.; Driscoll R. H. 1995. Kinetics of non-enzymatic browning in onion slices during isothermal heating. *Journal of Food Engineering* 24(3): 417-429.
- Rapusas R. S.; Driscoll R. H. 2002. Modeling and optimization of a three-stage conveyor type dryer for the dehydration of onion slices. ASAE Paper 023147. ASAE, MI, USA.
- Reusse E. 2002. The Ills of Aid: An Analysis of Third World Development Policies. University of Chicago Press, Chicago.
- Riyad H.; Jacques B. 2001. Integration of a desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation, *Energy Conversion Management* 42: 1543-1558.
- Saimbhi M. S.; Padda D. H.; Singh G. 1970. Evaluation of onion varieties for dehydration traits. *Journal of Food Science and Technology* 8: 149-50.
- Sandu C. 1986. Infrared radioactive drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology Progress* 2: 109-19.
- Wang J. 2002. A single-layered model for far-infrared radiation drying of onion slices. *Drying Technology* 20(10): 1941-53.