



SECADERO DE PRODUCTOS AGRICOLAS TIPO TENDALERO TRANSFORMADO EN SECADOR SOLAR PASIVO

A. Iriarte¹, C. Rodríguez², V. García y V. Luque

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. iriarteadolfo@gmail.com

RESUMEN: Los productores de la región oeste de Catamarca y de los Valles Calchaquíes tienen como principal actividad la producción de frutas, hortalizas y aromáticas deshidratadas. El secado tradicional es en canchones de tierra o enripiado y en tendaleros con exposición directa al sol, en contacto con el polvo e insectos. Lograr una mayor rentabilidad significa mejorar los procesos y sistemas de secado para obtener calidad a un costo razonable. Se propone agregar plásticos al tendalero tradicional de manera de conformar un secadero solar en convección natural. Para su diseño se explicita un método de cálculo sencillo y un modelo térmico de simulación previo como complemento. Se detallan los aspectos constructivos, resultados experimentales y la validación del modelo. La eficiencia promedio diaria del colector fue del 20,9 % y del secadero fue 28 %. Estos resultados demuestran que los cálculos para el diseño son aceptables y la adaptación del tendalero es factible.

Palabras Clave: secadero tendalero, secadero solar pasivo, diseño secadero, simulación secadero

INTRODUCCION

La región de los valles calchaquíes, que se extiende desde el Dpto. Belén pasando por el Dpto. Santa María en el oeste catamarqueño, hasta la provincia de Salta, se caracteriza por tener entre sus actividades principales la producción de frutas, hortalizas y aromáticas, con la particularidad que gran parte de esa producción se destina al deshidratado. En este sentido, la necesidad de una mejor rentabilidad y acceso a nuevos mercados obligó a los distintos sectores comprometidos con las cadenas de comercialización a la búsqueda de productos cada vez de mayor calidad, lo cual implica también mejorar los procesos y modificar los sistemas de secado. Pero el mayor inconveniente se presenta en las dificultades para contar con un suministro energético adecuado y confiable en el caso de la electricidad y el elevado costo de los combustibles tradicionales en las regiones alejadas de los centros urbanos.

Como una alternativa de solución a estos problemas, se está imponiendo en varias regiones del país, el secado solar de productos agrícolas, considerando que la energía, además de ser una energía renovable, es libre, barata y no produce contaminación; aunque el sistema requiere mayor atención que los métodos de secado convencionales y de estudios adecuados para su implementación, en los que no deben dejarse de lado las evaluaciones del nivel económico, social y tecnológico de la comunidad donde se instalarían los secaderos.

En la provincia de Catamarca encontramos numerosas unidades económicas familiares dedicadas a la producción y comercialización de frutas, hortalizas y/o esencias aromáticas desecadas (pasas de uva, higo, pimienta para pimentón, orégano, etc.) donde en muchos casos constituye su primordial fuente de subsistencia (Rivera et al. 1986). Estos pequeños productores, en su gran mayoría, secan sobre el terreno natural constituido por suelo pedregoso o tierra apisonada en los tradicionales canchones. Existen también otros niveles de productores que utilizan diferentes dispositivos para secado de construcción sencilla entre los que se destacan los secaderos tipos tendaleros. Estos secaderos desde su incorporación al proceso productivo, ya sufrieron varias modificaciones en sus estructuras con el propósito de mejorar su eficiencia sin incrementar demasiado los costos. Así, Carabajal, 2002, propone cubrir el producto durante parte del día y la noche, con plásticos transparentes o negros. Pero choca con el inconveniente que estas prácticas necesitan de mano de obra para abrirlos (airearlos) al medio día solar y cerrarlos (proteger) al atardecer.

Considerando las características de alta radiación que posee la región y que la existencia de numerosas experiencias locales, nacionales e internacionales, Saravia et al. 1992, apoyan la factibilidad de introducir algunas mejoras a estos tipos de secaderos. En este sentido, teniendo en cuenta los secaderos (tendaleros) que se están usando actualmente y la necesidad de aumentar la eficiencia y la calidad del secado, se diseñó y construyó un secadero sobre la base de un tendalero. Esto es, incorporando tecnologías solares sencillas ya probadas, se pretende obtener un secado eficiente, sanitario y un producto final de muy buena calidad.

En el presente trabajo se detallan sintéticamente los cálculos previos para el diseño del secadero, el modelo higrotérmico previo para la determinación de las posibles variantes del diseño y de los parámetros generales de funcionamiento. Se detallan aspectos constructivos del prototipo ensayado, resultados experimentales y la validación del método y modelo utilizado. Se muestran además los resultados obtenidos durante el proceso de secado de tomate.

MATERIALES Y MÉTODO

Parcialmente financiado por UNCa, INTA

¹ Investigador del CONICET

² Subsecretaría de Ciencia y Tecnología, Gob. Ctca.

Para el diseño del secadero se propone un método que consiste en una serie de cálculos previos y una simulación aproximada con datos extraídos de la bibliografía, fichas del producto y datos de otras experiencias.

Cálculos previos

La cantidad de aire por unidad de tiempo [kg/h], necesaria para secar se puede expresar en función de parámetros climáticos promedios para un día solar típico (por ejemplo de invierno), la velocidad de secado (v_s) y la humedad específica, utilizando las ecuaciones que se detallan a continuación:

$$G_s = \left(\frac{v_s}{\rho_a (w_{m,s} - w_{m,e})} \right) \quad (1)$$

$$\text{con } v_s = \frac{m_w}{t_s}$$

La humedad específica media del aire a la entrada del secador ($w_{m,e}$) [kg/kg a.s.], en la mayoría de los casos es aproximadamente igual a la humedad específica del aire exterior y se la puede obtener a partir del dato meteorológico de la humedad relativa ambiente promedio y la curva psicométrica o mediante la siguiente expresión:

$$w = 0,62198 \frac{HR P_s}{(P - HR P_s)} \quad (2)$$

En cuanto a la humedad específica media del aire a la salida del secador se propone obtenerla de una forma aproximada, considerando que la humedad relativa media a la salida del secador ($HR_{m,s}$) varía durante el secado entre un máximo que puede llegar al 100 % (cuando el agua a evaporar esta enteramente libre) y un mínimo cuando el producto ha alcanzado su estado final de humedad (X_f). Entonces HRe,f es la humedad relativa del aire en equilibrio con el producto al final del proceso de secado (grado de actividad del agua a_w como relación entre la presión de vapor de un alimento en relación con la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura):

$$HR_{m,s} = \frac{(100 + HRe, f)}{2} \quad (3)$$

El valor de HRe,f , lo podemos determinar en función de X_f en las curvas de sorción del producto, disponibles en la bibliografía. La velocidad de secado (v_s) expresada en kg de agua extraídos del producto por unidad de tiempo en función de la masa húmeda será:

$$v_s = \frac{m_i}{t_s} \left(\frac{M_i - M_f}{100 - M_f} \right) \quad (4)$$

La potencia necesaria para secar será:

$$P_n = \rho_a (h_{a,s} - h_{a,ex}) G_s \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

La energía necesaria será:

$$E_n = 10^3 P_n t_s \quad [\text{MJ}] \quad (6)$$

t_s = tiempo de secado en segundos

Si la eficiencia del secador es η la energía solar sobre la superficie de captación necesaria será:

$$E_s = \frac{E_n}{\eta} \quad [\text{MJ}] \quad (7)$$

La energía solar aportada en función de la irradiación diaria (R_a [MJ/m² día]), es:

$$E_s = A_c R_a t_d \quad [\text{MJ}] \quad (8)$$

t_d = tiempo de secado en días solares

Esta última expresión (8) permite balancear el área de colección con el tiempo de secado.

Para establecer el área más conveniente aplicando el proceso de cálculo precedente se han realizado las siguientes consideraciones: adoptamos como producto tomate cortado en gajos; peso inicial 120 kg; peso seco 4,68 kg (3,9 % de la masa húmeda). Se estimó además un contenido de humedad final del 7 %, con lo cual el peso final del tomate estará en el orden de 5,0 kg.

De los registros meteorológicos, para un día de invierno y para las horas de sol factibles de secar, se calcularon: temperatura promedio del aire de entrada (20 °C); humedad relativa media del aire a la entrada (23 %) e irradiación diaria sobre superficie

horizontal ($R_a=20 \text{ MJ/m}^2\text{día}$). Se estimó un tiempo de secado de 3 días, una temperatura promedio del aire a la salida del secadero de 37 °C y una eficiencia media del secadero del orden del 20 %. Con estos datos, la potencia necesaria para evaporar 110,28 kg de agua del producto resulta $P_n = 4,13 \text{ kW}$ y la energía necesaria para 3 días de secado de 8 horas diarias $E_n = 356,83 \text{ MJ}$. De la curva de sorción del tomate para $X_f = 7,9 \%$, se obtuvo una actividad del agua del 40 % y de la energía aportada por la radiación solar $E_s = 1.784 \text{ MJ}$ usando la ecuación (8) donde resulta un área $A \approx 30 \text{ m}^2$.

Descripción del prototipo diseñado

El diseño adoptado tiene una forma cuasi-triangular, cubierta con plástico. Los lados inclinados hacia el norte están cubiertos por plástico transparente LDT (150 micrones), mientras que en su pared posterior vertical esta cubierta por plástico negro (200 micrones).

El sistema está constituido por dos partes principales: a) el colector – acumulador de calor y b) la cámara de secado. El primero, esta conformado por una platea de piedras graníticas seleccionadas, ubicadas a nivel del suelo y acomodadas de manera de conformar un espesor aproximadamente uniforme. Tiene 10 m de largo y se extiende 1,50 m hacia adelante de la cámara de secado. En su extremo frontal inferior, una abertura de 0,15 m de alto, por toda su longitud permite la entrada del aire desde el exterior, Fig. 1.

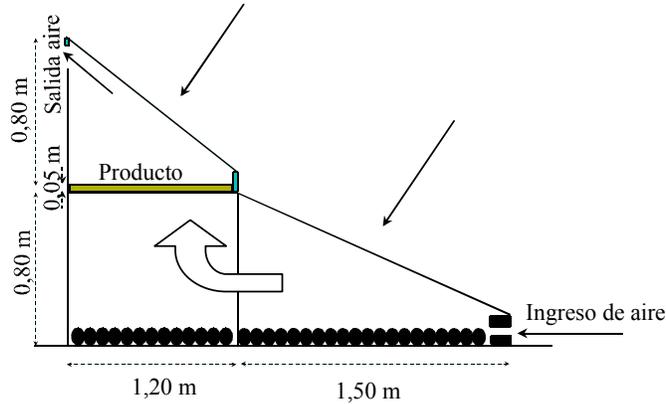


Fig. 1. Esquema del tendalero reacondicionado

La cámara de secado, ubicada en la parte posterior del colector y sobre elevada 0,80 m del nivel del terreno natural, contiene las bandejas para soportar el producto. El tendalero (soporte de las bandejas) tiene 1,20 m de ancho por 10 m de longitud. En la pared posterior de la cámara lleva unas ventanas regulables para permitir la salida del aire húmedo al exterior. Este último tramo se puede considerar como una chimenea solar.

Con este diseño el área de colección del colector resulta de 15 m^2 y la del recinto de secado, que también actúa como colector solar, de 12 m^2 , por lo que el área total sería de 27 m^2 , valor que se ajustará finalmente con la simulación del modelo higratérmico.

Análisis teórico - Ecuaciones de funcionamiento.

Colector solar. En general, al colector solar lo podemos considerar como un colector plano y cuya eficiencia es:

$$\eta = \frac{q_u}{Ac I} = F_R \left[(\tau \alpha) - \frac{U_L (T_f - T_{a,ex})}{I} \right] \quad (9)$$

Cámara de secado. El intercambio de calor y humedad en la zona donde encuentra el producto, puede ser descrito mediante las ecuaciones:

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (10)$$

Donde k es un coeficiente que depende de las condiciones de transferencia de calor y humedad sobre la superficie del producto; M contenido de humedad del producto y M_e contenido de humedad en equilibrio.

$$k = k_d A_p \quad (11)$$

donde $k_d = \frac{h_c}{L_e c_{p,a}}$

El balance térmico en el producto esta dado por:

$$\rho_p (c_{p,p_s} + c_{p,w} M) \frac{dT}{dt} = A_p h_c (T_{a,c} - T_p) + \rho_p h_{lv} \frac{dM}{dt} \quad (12)$$

El primer término de la derecha de la ecuación (12) expresa la transmisión de calor desde el aire de la cámara al producto, a través de una superficie saturada de agua del producto, mientras que el segundo término expresa el calor necesario para cambio de fase durante la evaporación.

La eficiencia del secadero será:

$$\eta_s = \frac{P_n}{I_{Ac}} = \frac{0,27 \rho_a (h_{a,s} - h_{a,ex}) G_s}{I_{Ac}} \quad (13)$$

0,27 es un factor de conversión dimensional

Aspectos constructivos

El prototipo ha sido construido de acuerdo con los valores obtenidos en el diseño. Es una estructura de madera, edificada sobre la base de un tendalero. La zona de bandejas tiene 1,20 m de ancho por 10 m de longitud, construida con una malla metálica de alambre galvanizado colocada dentro de un marco de madera, reforzado por planchuelas de hierro para conferirle mayor rigidez a la superficie de apoyo Fig. 2.

En la zona del tendalero, sobre la malla de alambre, se colocan las bandejas de madera con malla plástica (tipo media sombra), para mejorar el manejo del producto y evitar el contacto del producto con posibles formaciones de óxido.

En la pared vertical posterior, de 1,60 m de alto, se realizaron en la parte superior pequeñas ventanas de 0,10 x 0,20 m separadas cada metro, con un sistema que permite regular manualmente la apertura para controlar la salida del aire húmedo. Tanto la pared frontal inclinada como la vertical posterior, están cubiertas con un plástico transparente LDT de 150 micrones y plástico negro respectivamente, para lograr el efecto invernadero dentro del recinto. En la figura 3 se muestra una vista del secadero construido.

Sistemas de medición

Para medir la temperatura se colocaron termopares tipo T, calibrados ($\pm 0,5$ °C.) en diferentes puntos del colector y cámara de secado. Para la recolección de estos datos se utilizó un Data Logger tipo ADAM conectado a una PC. La humedad relativa y temperatura a la entrada, sobre bandejas, en el producto, la salida del secadero y puntos estratégicos se midieron con Data Logger tipo HOBOS inalámbricos con sensores internos y externos; temperatura ($\pm 0,5$ °C) y humedad ($\pm 1\%$). Las muestras se pesaron con una balanza electrónica (0,1g) y el producto con una balanza de plato (± 1 g). La radiación solar se midió con un piranómetro inclinado Kipp & Zonen ($\pm 5\%$). Se dispone de una estación meteorológica en el lugar de la experiencia.



Fig. 2. Vista de la estructura del tendalero modificada



Fig. 3. Vista del tendalero solar pasivo

SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO “DISEÑO PREVIO”

En el modelo de simulación del secadero debe tenerse en cuenta los procesos de transferencia de calor del aire a la superficie del producto y la difusión del agua a través de las distintas capas que conforman el mismo.

Como en este trabajo se trata de disponer de una herramienta de diseño, complementaria a los cálculos previos, se estima que solo es necesario validar el modelo higrotérmico del secador durante el periodo de secado constante, etapa de secado que se extrae el agua libre y superficial del producto. Para una simulación completa del proceso de secado será necesario incorporar el proceso de contracción del producto y consecuentemente las variaciones en el área de transferencia y en la difusión del agua desde el interior del producto.

Modelo SIMUSOL del colector y la cámara de secado

Como los cálculos que se necesitan para disponer de datos para el diseño, no necesitan ser precisos, se puede considerar para el modelo térmico solo un nodo representativo del aire en el colector (3c), precámara (3s) (salida colector) y cámara (8s). La identificación “c” significa colector y “s” secado, Fig. 4. Esta figura muestra un esquema de los elementos físicos que conforman el colector solar, la precámara y la cámara. Separados están los circuitos que corresponden al intercambio de calor y masa con el producto. Ambos circuitos están unidos por el nodo 8s, mientras el circuito de humedad se vincula a través del coeficiente de transferencia de masa que esta incorporado en la R120. El nodo 6 representa al ambiente, el nodo 3c el aire que

pasa por el colector. Este esta formado por una capa de piedra (4c) cubierta con un plástico negro que constituye el absorbedor - acumulador del sistema. Las piedras están asentadas sobre el piso, unido térmicamente al suelo (tierra) por la resistencia conductiva RSp1.

Una cubierta transparente (2c) cierra el ducto trapezoidal, permitiendo el ingreso de la radiación representada por el elemento de flujo J2cR. Se incluyen en el diagrama del colector las pérdidas convectivas y radiativas al ambiente exterior. El aire interacciona térmicamente con el absorbedor y la cubierta, mediante elementos convectivos R3c y R4c. Además, el absorbedor y la cubierta intercambian directamente radiación entre sí, al tratarse de un plástico LDT, y por ésta razón la pérdida de radiación entre el absorbedor y el cielo no se tuvo en cuenta. El aire que ingresa por el nodo 3c se mueve por convección natural, mediante un elemento de flujo JE1. Este flujo depende de la diferencia de temperatura entre el aire de entrada en el nodo 6 (T6) y la temperatura de salida nodo 8 (T8s). Su valor numérico puede expresarse como:

$$\text{Flujo} = C\sqrt{T(8s) - T(6)} \quad (14)$$

El aire ingresa al secadero por un pleno de 1.20 m de ancho por 0.80 m de alto, en cuya base hay una capa de piedra cubierta por un plástico negro (4s). La radiación ingresa por la cubierta de plástico de la cámara (2s) y es absorbida una parte por el producto (P) y otra por el absorbedor - acumulador de piedra de la base. Resistencias convectivas y radiativas intercambian calor con el ambiente exterior y el flujo JSal es el responsable de sacar el aire al exterior por la parte superior de la cámara. El nodo 8s es el que produce el intercambio de calor entre el producto y el aire que ingresa a la cámara. Por otro lado, en el circuito de vapor de agua los nodos representan humedades, allí se incluye la humedad transferida desde la superficie del producto al aire caliente y seco, que circula alrededor del producto.

El circuito térmico esta representado por los nodos P (producto) y 8s (aire caliente seco). Ambos están intercambiando calor mediante un flujo de calor J50 que representa el calor de vaporización del agua debido al agua evaporada y R50 es la resistencia convectiva asociada a la transferencia de calor por convección entre el aire y el producto. El condensador CP representa la masa del producto a secar (Sogari N., *et al.*, 2005).

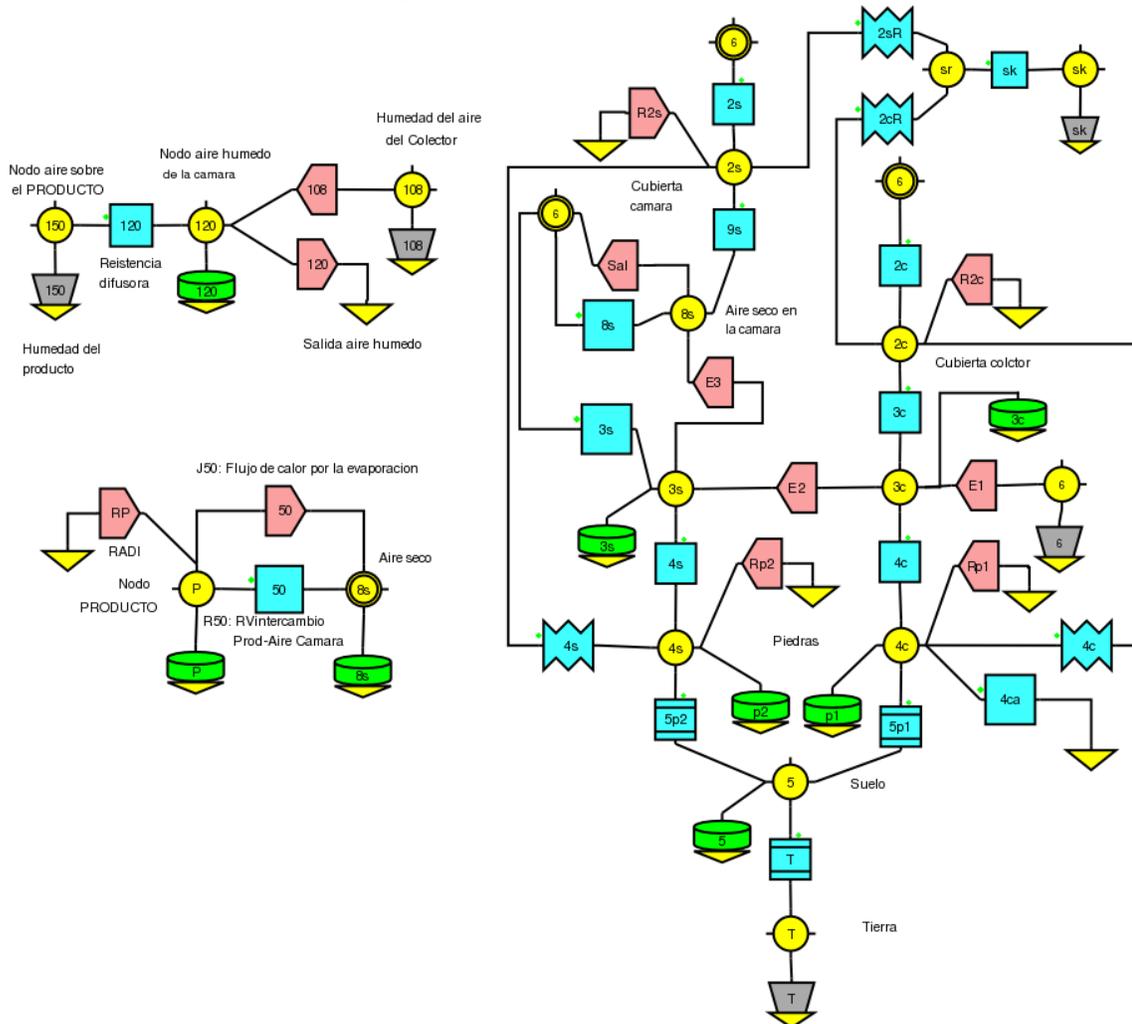


Fig. 4. Diagramas higrotérmicos Simusol del secadero

El nodo 108 esta conectado a una fuente de tensión que representa el contenido de humedad del aire que ingresa a la cámara de secado. Mediante J108 transfiere humedad al nodo 120 que representa el aire húmedo de la cámara, mientras J120 es la cantidad de humedad que arrastra el aire hacia el exterior del sistema. El condensador J120 representa el contenido de humedad total existente en la cámara. El contenido de humedad del producto esta representado por E150 en el nodo 150, nodo que representa al aire sobre el producto. La resistencia R120 representa la transferencia de masa (vapor de agua) desde el producto a el aire que lo rodea (nodo 120).

Validación del modelo previo

Los coeficientes convectivos, conductivos y radiactivos que se usaran en el modelo térmico fueron calculados teniendo en cuenta las propiedades físicas y térmicas de cada uno de los materiales que se utilizaron para su construcción. Para realizar el ajuste del modelo a los resultados experimentales obtenidos en los ensayos, se tuvo en cuenta que las condiciones de una de las componentes del secadero están ligadas al resto del mismo y depende del aporte o reducción de calor de la otra. En este sentido, con el propósito de mantener las contribuciones del colector y lograr un buen ajuste se ha incorporado una fuente de tensión con tabla que contiene los datos experimentales. Los ajustes se realizaron principalmente en los procesos de transferencia de calor y masa. De este procedimiento surge una modificación del 2 % del coeficiente de absorción de la radiación solar incidente sobre superficie horizontal y sobre el producto.

En la Fig. 5 se muestra la variación de la temperatura del producto ubicado en las bandejas sobre el tendalero obtenidas por la simulación [Tp_S] en contraste con la experimental [Tp_E] para el primer día de secado. Del análisis de los datos se observa que la desviación entre los datos experimentales y simulados, en promedio, fue de 0,87 °C y un error relativo respecto al valor experimental de 3,2 %.

En lo que respecta a la variación del peso del producto respecto del peso inicial obtenido de la simulación [P/Po_S] en contraste con el experimental [P/Po_E] se advierte una buena concordancia. Al principio del secado, los valores experimentales son más bajos, lo que significa que pierde humedad más rápidamente, Fig. 6.

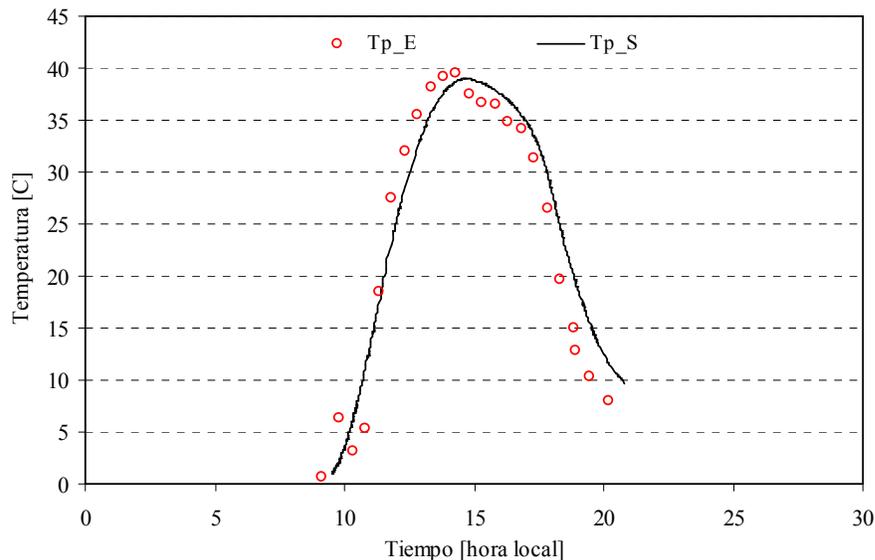


Fig. 5. Variación de la temperatura del producto experimental y simulada

El valor del coeficiente convectivo relacionado con la transferencia de masa es $4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. La diferencia o la desviación respecto de los valores experimentales fue en promedio de $0,002 \text{ kg/kg}$ húmedo y el error relativo respecto de los valores experimentales fue de 2 %. El flujo promedio obtenido luego del ajuste del modelo de simulación fue de $0,06 \text{ kg/s}$, algo mayor que el obtenido en los cálculos previos ($G_s = 0,04 \text{ kg/s}$). Esta magnitud es muy difícil medir por ser un parámetro muy pequeño, los valores experimentales obtenidos tienen un error mayor de lo esperado.

COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO

Las experiencias de secado se realizaron con tomate y pimienta, a continuación describen los resultados obtenidos con el tomate.

La Fig. 7 muestra la variación de las temperaturas del aire y del producto durante el proceso de secado. Se observa que, si bien durante la noche las temperaturas tanto de las bandejas como del producto son inferiores a la del aire en el exterior del secadero ($T_{a,e}$), durante el día se invierte esta tendencia y se registra un rápido calentamiento del aire que circula por las bandejas ($T_{a,bB}$) produciendo un significativo incremento en la temperatura del aire alrededor del producto ($T_{a,P}$) y consecuentemente del producto mismo (T_p), alcanzando diferencias de hasta $30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

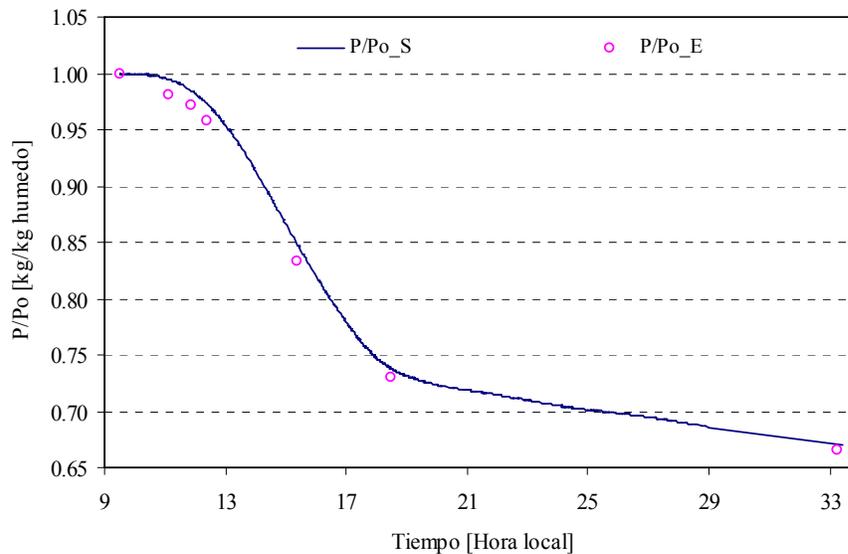


Fig. 6. Variación de la relación peso húmedo – peso inicial experimental y simulado

Los mayores valores de temperaturas se alcanzan en las horas de mayor radiación, mostrados en Fig 8., y que coinciden con las horas en que se registran las mayores pérdidas de humedad. Es importante destacar que a pesar que la radiación durante el tercer día de secado es similar a los días anteriores, se registró una disminución en la eficiencia de calentamiento del colector, a causa del soplado de fuertes ráfagas de viento norte en la zona donde esta ubicado el prototipo.

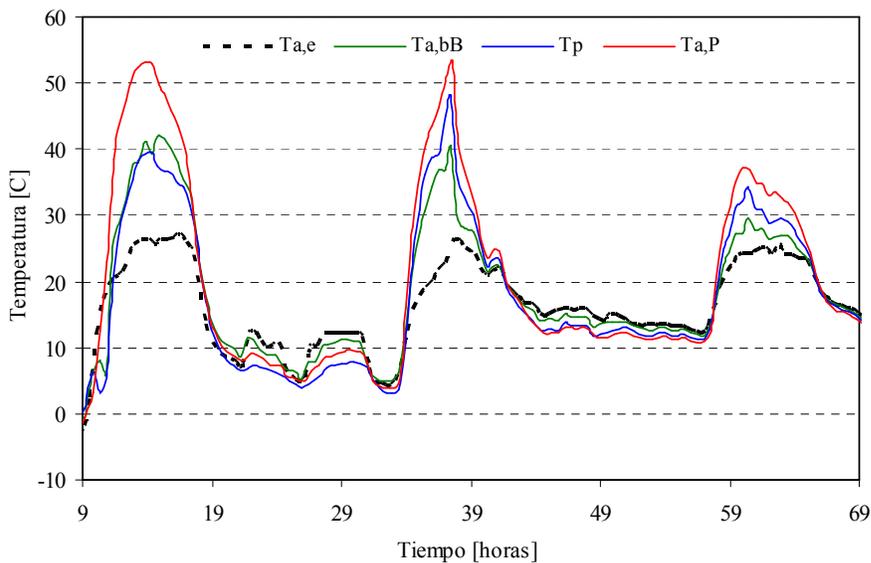


Fig. 7. Variación de las temperaturas del aire y el producto durante el proceso de secado.

La humedad relativa del aire en las bandejas (HRA,B) acompaña las variaciones que sufre la humedad relativa del aire en el secadero (HRA,s) aunque con oscilaciones menos pronunciadas durante el primer día de secado. Con la particularidad que los valores se mantienen inferiores en las primeras 30 horas para luego pasar a valores superiores a esta en las horas posteriores. La pérdida de humedad del producto que puede apreciarse en la humedad que gana el aire dentro del recinto de secado puede percibirse cuando se observa que al comienzo del proceso la humedad relativa del aire en el ambiente exterior al secadero (HRA,ex) es superior a la que posee el aire dentro del secadero (HRA,s), y luego del primer día de secado esta situación se invierte en especial en horas de la noche.

Con los datos experimentales obtenidos y el flujo ajustado por el modelo de simulación, se obtiene una eficiencia promedio diaria del colector de 20,9 % y del secadero de 28 %.

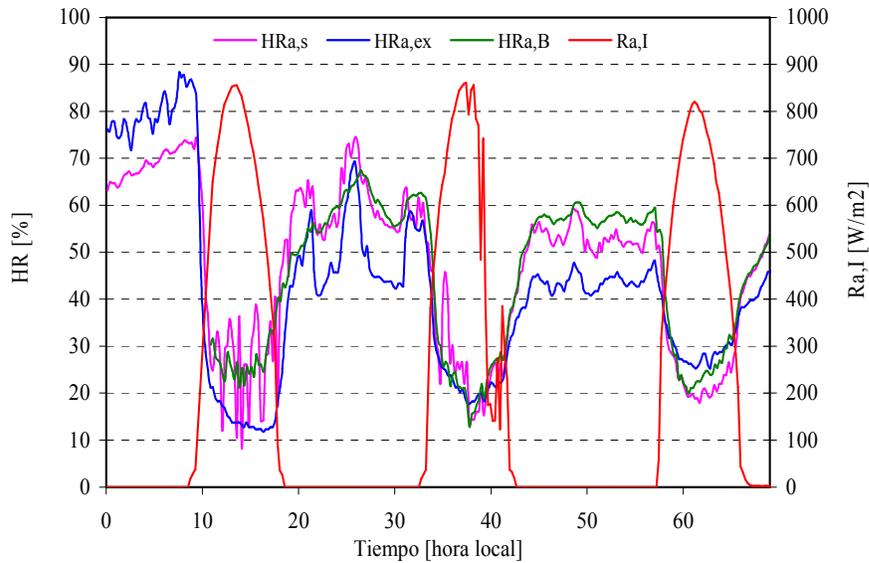


Fig. 8. Variación de la radiación y humedad relativa del aire durante el proceso de secado.

En la Fig. 9 y 10 se muestran las bandejas del secadero cargadas con tomate y pimiento antes de cada secado. El tomate seco obtenido es de primera calidad, con un color rojo opaco, y sin manchas negras, mientras que el pimiento tiene un color adecuado, pero sus bordes son oscuros debido a la oxidación del corte.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada para el diseño, la caracterización física y térmica en sus diferentes configuraciones o situaciones de uso, así como la información generada, permiten disponer de herramientas de diseño muy útil. La validación del modelo muestra una razonable desviación promedio diario de las temperaturas. Los resultados de la simulación del proceso de intercambio de masa permiten predecir el funcionamiento del secadero dentro de los niveles aceptables.

Las eficiencias del colector y secadero son adecuadas para convección natural. Se estima que estas podrían mejorarse aumentando la circulación de aire (flujo de aire) y optimizando la medición de dicho caudal.



Fig. 9. Vista de las bandejas cargadas con tomates cortados en gajos en el interior del secadero.



Fig. 10. Vista de las bandejas cargadas con pimientos cortados en cuartos en el interior del secadero.

NOMENCLATURA

Ac: Área de colección [m²]

c_{p,p_s} : calor específico del producto seco [J/kg °C]

$c_{p,a}$: calor específico del aire [J/kg °C]

$c_{p,w}$: calor específico del agua libre [J/kg °C]

M_e : contenido de humedad en equilibrio

P: presión atmosférica

P_s : presión de saturación

P/Po: relación de producto peso respecto húmedo

$h_{a,s}$: entalpía del aire a la salida del colector [kJ/kg]	P_n : potencia necesaria para secar el producto [kW]
$h_{a,ex}$: entalpía del aire a entrada del colector [kJ/kg]	R_a : irradiancia sobre superficie horizontal [MJ/m ² día]
h_c : coeficiente convectivo de transferencia de calor [W/m ² °C]	$R_{a,i}$: irradiación sobre superficie inclinada [W/m ²]
h_{1V} : calor de cambio de fase [J/kg]	$T_{a,bB}$: temperatura del aire debajo de la bandeja [°C]
E_n : energía total necesaria para secar el producto [kW]	$T_{a,c}$: temperatura del aire en la cámara [°C]
F_R : factor de remoción del colector	$T_{a,ex}$: temperatura del ambiente exterior al secadero [°C]
G_S : Flujo másico de aire [kg/h]	$T_{a,p}$: temperatura del aire al lado del producto [°C]
$HR_{m,s}$: humedad relativa media del aire a la salida secadero [%]	T_p : temperatura del producto [°C]
$HR_{e,f}$: humedad realtiva del aire en equilibrio con el producto final [%]	T_f : temperatura del fluido (aire) [°C]
$HR_{a,B}$: humedad relativa del aire en la bandeja [%]	U_L : coeficiente de perdida global del colector [W/m ² °C]
$HR_{a,ex}$: humedad relativa del aire exterior [%]	V_S : velocidad de secado [kg/s]
$HR_{a,s}$: humedad relativa del aire en la cámara de secado [%]	w : humedad específica [kg/kg a.s.]
I : irradiancia solar [W/m ²]	$w_{m,e}$: humedad específica del aire a la entrada del secador [kg/kg a.s.]
Le : numero de Lewis	$w_{m,s}$: humedad específica del aire a la salida del secador [kg/kg a.s.]
M_i : contenido de humedad inicial del producto [%]	X_f : contenido de humedad base seca del producto final [%]
M_f : contenido de humedad final del producto [%]	ρ_a : densidad del aire [kg/m ³]
m_w : masa de agua en el producto [kg]	ρ_p : la densidad del producto seco [kg/m ³]
m_i : masa inicial del producto [kg]	$(\tau \alpha)$: transmitancia – absorbanza de la cubierta
	η : eficiencia

REFERENCIAS

- Carabajal D. Secadero tendalero con cubierta plástica. Folletos de divulgación de INTA Catamarca, 2002.
- Rivera D, J. Sequi, A. Iriarte y V. García. Secado solar pasivo para pequeñas unidades de producción ASADES. Acta 11va. Reunión de ASADES San Luis, pág. 47 - 52, 1986.
- Saravia L., R. Corvalán, M. Horn, R. Román. Ingeniería del secado solar. CYTED.. Ed. Impresos Universitarios. 1992.
- Sogari N., L. Saravia y D. Alia. Simulación del funcionamiento de un secadero solar con circulación de aire por convección natural. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta, 2005.

ABSTRACT:

The principal activity of the producers in the western region of Catamarca and the Calchaquies Valleys is the production of fruits, vegetables and dried aromatic herbs. Traditional drying is done directly on the bare ground or gravel, and on racks with direct sunlight, in contact with dust and insects. To achieve better cost-effectiveness means to improve the processes and drying systems for quality at a reasonable cost. The proposal is to add plastics to the traditional rack as a way of forming a natural convection solar dryer. For the design, a simple calculation method and a thermal model to complement previous simulation. The construction aspects, experimental results and model validation are detailed. The daily average collector efficiency was 20.9% and that of the dryer was 28%. These results demonstrate that the calculations for the design are acceptable and the rack adaptation is feasible.

Key words: rack dryer, passive solar dryer, dryer design, dryer simulation