

SECADO SOLAR DE PIMIENTO: RESULTADOS
EXPERIMENTALES Y SU SIMULACION

Luis Saravia, Víctor Passamai y Ricardo Echazú

INENCO[#], Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

Resumen

Se realizaron experiencias de secado solar de pimiento mediante un sistema que consta de colectores de plástico y túnel de secado, modificados a partir de un diseño anterior (1). Asimismo se realizaron experiencias de secado de pimiento a escala de laboratorio para formular un modelo del proceso. Ambas tareas fueron realizadas durante la campaña marzo-abril de 1984 en los Valles Calchaquíes y en la ciudad de Salta, respectivamente.

Las modificaciones introducidas comprenden la longitud del colector, el tipo de plástico y el procedimiento de montaje.

Las magnitudes medidas fueron las variables meteorológicas, la distribución de temperaturas en el colector y curvas de secado del pimiento. Se ha simulado por vía numérica el comportamiento del colector y del pimiento y los resultados son comparados con los valores experimentales.

1. Introducción

Durante la temporada de secado de pimiento de febrero a abril/83 en los Valles Calchaquíes, Salta, se instaló un sistema solar de secado de dicho fruto con la colaboración de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Nación (Plan Nacional de Energía No Convencional), la Secretaría de Industria de la Provincia de Salta y la Cooperativa Agrícola del Valle Calchaquí en Cachi.

La descripción del sistema, que constaba de colectores de plástico con un área de 300 m² y un túnel de secado con un área transversal de 4 m² y 18 m

de largo, y las experiencias preliminares, fueron presentadas en un trabajo anterior (1). Dichas experiencias mostraron la necesidad de introducir algunas modificaciones que se describen en este trabajo, juntamente con los resultados obtenidos en la campaña marzo-abril/84 y una simulación numérica que comprende al colector y al proceso de secado. Para simular el secado de pimiento se debieron realizar experiencias de laboratorio que permitieron formular primeramente un modelo de la pérdida de agua basado en una resistencia interna que se determinó como función del contenido de agua del fruto, en forma semejante a lo encontrado para el tabaco (2), mediante la determinación experimental de curvas de secado obtenidas en una cámara piloto.

2. Diseño definitivo de la planta de secado

Las experiencias realizadas en marzo-abril/83 mostraron la necesidad de introducir algunos cambios en el diseño antes de comenzar la campaña 84. Ellos fueron los siguientes:

- 1) El sistema de sujeción del plástico a las vigas laterales en el suelo mediante tirantes de madera y grampos sujetas a las vigas funcionó bien a lo largo del colector con excepción de los extremos, donde el colector adoptaba una forma cónica para poder ser conectado con los ventiladores. La necesidad de considerar simultáneamente la sujeción, el adaptar el plástico a la disminución de sección y el adherir el plástico a la cañería de entrada o salida de los ventiladores hacía la tarea muy engorrosa no siendo apropiada para un operador de campo y produciendo roturas del plástico.

Se decidió adoptar una nueva forma para los extremos, la que se des -

[#] INSTITUTO UNSa. - CONICET

cribe en la Fig. 1. En la zona cónica las vigas de sujeción se van levantando del suelo formando una pared de altura creciente hasta llegar al nivel de los bordes del ventilador donde se acoplan la pared y la cañería de salida. El plástico sólo cierra la apertura entre las paredes, lo que se hace con sencillez.

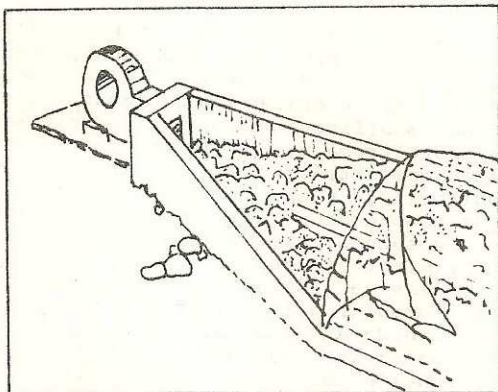


Fig. 1 - Detalle del colector

- 2) Las temperaturas de salida de los colectores eran algo bajas para el flujo que daban los ventiladores instalados, por lo que se decidió alargarlo de 30 a 45 m de longitud. En la longitud adoptada también influyó el cambio de plástico que se menciona en 3). Dado que la pérdida de carga en la zona recta de los colectores es muy baja, el aumento no produjo cambios en los ventiladores.
- 3) El polietileno de 200 micrones de espesor usado en la campaña anterior no dió buenos resultados. Por un lado el polvo tiene tendencia muy pronunciada a pegarse debido a la carga eléctrica adquirida por el plástico bajando bastante su transmisividad, que alcanza el 50% a poco de ser usado para 2 capas. Por otro lado su rigidez tiende a producir roturas con facilidad. Se decidió usar PVC transparente que no pudo ser obtenido en la campaña anterior. Se agradece a la autoridades y personal del CNIE por la cesión del mismo.

Por otro lado se utilizó una sola capa en vez de dos ya que la disminución de transmisividad producida por la segunda capa neutraliza en buena parte, sobre los últimos metros del colector, la ventaja obtenida por disminución de las pérdidas

convectivas.

- 4) La puerta de salida del túnel fabricada en tela metálica para permitir la salida del aire húmedo permitía la entrada de viento que interfería con el flujo de aire y entraba polvo. Se colocó una pantalla metálica móvil a poca distancia de la puerta para eliminar el problema.

3. Resultados obtenidos en la campaña marzo-abril/84

A causa de la lluvias, la cosecha 1984 comenzó a fines de marzo y no en febrero, como se hace habitualmente. Esto ocasionó inconvenientes en la provisión del fruto fresco para el secado, por lo que no pudo cargarse totalmente el túnel. Además los niveles de radiación fueron menores, de 1100 W/m^2 registrados en febrero se trabajó con 1000 W/m^2 en el período marzo-abril.

Se midieron las temperaturas del aire a la entrada, la salida y en puntos intermedios de los colectores, con un termómetro Keithley 870 a termocupla de NiCr-NiAl.

La medida de radiación solar se realizó con un solarímetro Kipp & Zonnen de constante igual a $4,72 \text{ mV/(kW.m}^2)$ y un multímetro Kaise 6201 con resolución de 100 uV .

Para determinar el flujo de aire en los colectores, se colocaron tubos de 55 cm de diámetro y 4,5 m de largo a la entrada de los ventiladores y se midió el perfil de velocidades a lo largo de dos diámetros ortogonales, empleándose para ello un anemómetro térmico TSI 1650.

Se siguió la evolución del peso de dos bandejas, una con frutos enteros y otra con trozados. La Fig. 2 muestra las curvas

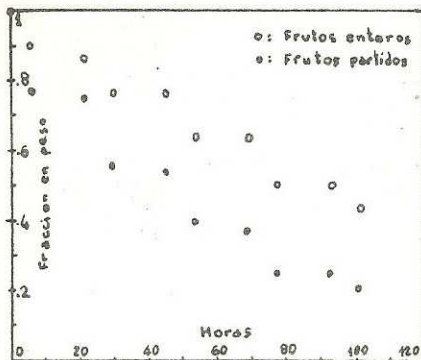


Fig. 2 - Curvas de secado para frutos enteros y partidos

vas de secado correspondientes.

4. Simulación numérica del colector

El colector es horizontal y consta esencialmente de una capa de piedras sobre un aislante colocado en el suelo y un plástico inflado sobre la capa de plástico, como se esquematiza en la Fig. 3. En un trabajo anterior

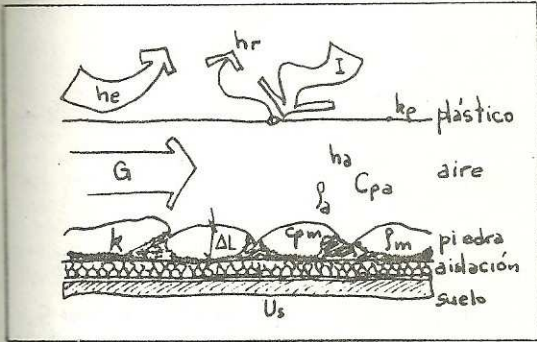


Fig. 3 - Parámetros para la simulación del colector

(1) se modelizó el sistema teniendo en cuenta la variación de la temperatura en la piedra tanto a lo largo del colector como en la profundidad del lecho. El hecho de que la masa de piedra está formada por piedras grandes superpuestas lo convierte en un lecho con una superficie muy irregular por lo que simular en detalle la variación de la temperatura en profundidad pierde importancia. En lo que sigue se supondrá que la masa tiene una temperatura \$T_m\$ dependiente sólo del tiempo \$T\$ y de la distancia \$x\$ a lo largo del colector, simplificando sensiblemente el análisis numérico del problema. El comportamiento térmico del colector está dado por tres ecuaciones de balance energético: para la masa de piedra, el aire y el plástico en cada punto \$x\$ e instante \$T\$. Ellas son:

balance en la piedra:

$$\rho_m c_{pm} \frac{\partial T_m}{\partial t} = h_a (T_a - T_m) + h_r (T_p - T_m) + U_s (T_s - T_m) + k_m I + k \Delta l \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2}$$

balance en el aire:

$$\frac{G}{d} c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_a (T_m - T_a) + h_a (T_p - T_a)$$

balance en el plástico:

$$0 = h_a (T_a - T_p) + h_e (T_e - T_p) + h_r (T_m - T_p) + k_p I$$

donde:

\$T_m, T_a, T_p, T_e\$ y \$T_s\$: temperaturas de la piedra, del aire, del plástico, externa y del suelo bajo del colector respectivamente.

- \$h_a, h_e\$: coeficientes convectivos del aire
- \$h_r\$: coeficiente radiativo masa-plástico
- \$U_s\$: coeficiente de transmisión térmica de la aislación
- \$G\$: flujo de aire
- \$c_{pm}, c_{pa}\$: calores específicos de la piedra y el aire
- \$\rho_m\$: densidad de la piedra
- \$\Delta l\$: espesor de la masa de piedra
- \$d\$: ancho del colector
- \$k\$: conductividad térmica de la piedra
- \$I\$: radiación incidente
- \$k_m\$: porcentaje de la radiación absorbida por la piedra
- \$k_p\$: porcentaje de la radiación absorbida por el plástico.

Como condiciones de borde se supone que al comenzar el día la masa de piedra está a la temperatura del aire a la entrada del colector es la ambiente y que la masa de piedra no tiene pérdidas térmicas en su perímetro.

Estas ecuaciones se resuelven en computadora mediante un esquema en diferencias finitas.

En el cálculo numérico resulta suficiente un incremento en el tiempo de 12 minutos y en \$x\$ de 1,5 m. La Fig. 4 muestra resultados obtenidos del modelo, correspondientes a valores horarios de radiación y temperatura externa, junto a los valores experimentales. Se observa que la coincidencia de las temperaturas de salida es buena.

Estos resultados fueron obtenidos con el siguiente conjunto de parámetros:

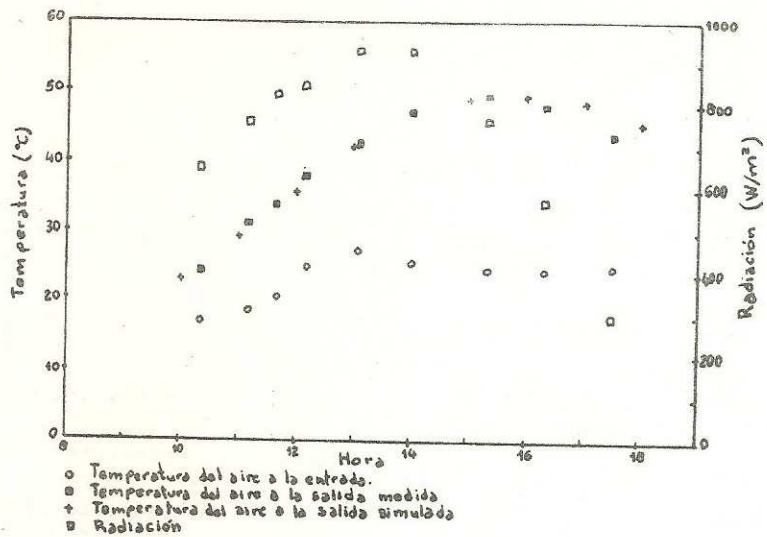


Fig. 4 - Datos de campo y temperatura simulada a la salida del colector

$$h_a = 12 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

$$k_p = 0,15$$

$$c_{pa} = 1000 \text{ J/kg C}$$

$$G = 2,15 \text{ kg/s}$$

$$h_e = 12 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

$$k_m = 0,60 - 0,75$$

$$d = 4,8$$

$$h_r = 4,5 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

$$U_s = 1,5 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

$$\Delta l = 0,10 \text{ m}$$

$$c_{pm} = 1000 \text{ J/kg C}$$

$$p_m = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 1,2 \text{ W/m C}$$

Teniendo en cuenta que los resultados de la modelización son aceptables, estos parámetros pueden servir de base para el diseño de otros sistemas de uso industrial.

5. Experiencias de secado en un dispositivo de laboratorio

Contando con muestras de pimientos de dos especies (largos y redondos), se realizaron dos ciclos de secado a escala de laboratorio bajo condiciones

extremas de temperatura (baja y alta), usándose un dispositivo que fuera especialmente diseñado para tabaco(3) en el que se adaptó una bandeja de alambre tejido. Las experiencias se efectuaron en coincidencia con la época de cosecha y secado en el secadero túnel. No se efectuó control sobre la humedad del aire, cuyos valores resultaron de la determinación de la temperatura, controlada por un termostato (Fig. 5). Para medir las distintas magnitudes de interés se usaron un termómetro de mercurio, un hi-

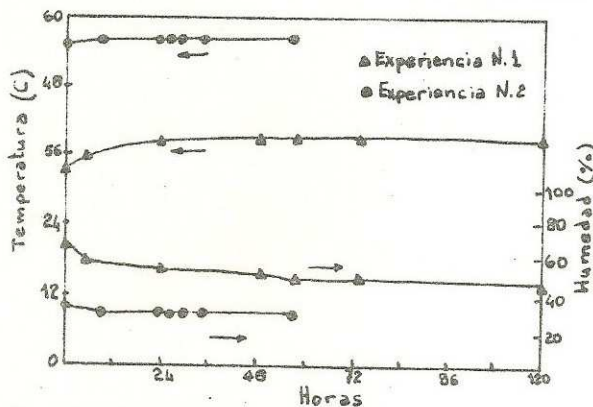


Fig. 5 - Temperatura y humedad resultante para las experiencias de laboratorio

grómetro de hilo y una balanza analítica cuyas apreciaciones eran de medio grado, del 2% y medio gramo, respectivamente.

Las muestras tenían un contenido inicial de agua de alrededor del 85% respecto del peso inicial en fresco y se emplearon entre 2,5 y 6 días para su secado, dependiendo del ciclo de temperatura elegido. Esta en ningún caso superó los 60 C, pues de haber sido así los pimientos habrían tomado una coloración no aceptable, como se observó en un ensayo previo. La humedad relativa del aire varió desde el 30% y hasta un 50%. Finalizado el secado (cuando las muestras no acusaban mayor variación del peso), se llevó el producto a estufa y se terminó de secar a 100 C con lo cual se determinó el peso totalmente seco. El contenido de agua residual antes de realizar esto último era de un 5% en relación al peso húmedo.

La ecuación de pérdida de agua, su puesta válida para este proceso, es la misma que se usó para describir el secado del tabaco (4):

$$- dx/dt = P_s (1 - \psi) / r(X) \quad (1)$$

donde X es el contenido de agua de la muestra (kg de agua por kg de pimiento totalmente seco), P_s la presión de vapor del agua a la temperatura del aire, ψ la humedad relativa del aire y $r(X)$ la "resistencia global a la evaporación" (4). Se graficó la inversa de esta resistencia versus el contenido de agua X, obteniéndose, dentro del error experimental una única correlación (Fig. 6). Se a

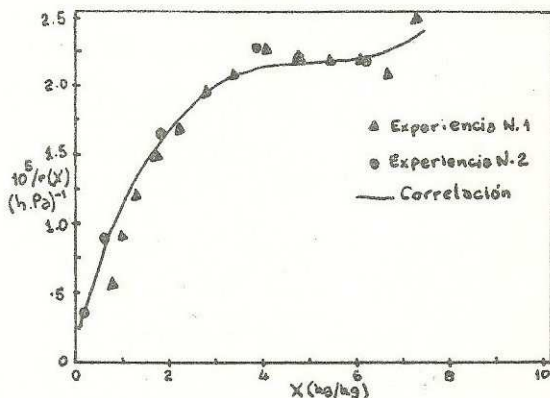


Fig. 6 - Inversa de la resistencia global o la evaporación Vs. el contenido de agua

justó una curva cúbica a los valores calculados que responden a la expresión:

$$1/r(X) = (1,27 + 11,8 \cdot X - 2,29 \cdot X^2 + 0,15 \cdot X^3) \times 10^{-6} \text{ (h.Pa)}^{-1} \quad (2)$$

Se resolvió la ecuación (1) introduciendo los datos de temperatura y humedad de la Fig. 5 y los contenidos iniciales de agua X_0 del pimiento obteniéndose las curvas de la Fig. 7 que muestran además los puntos experimentales. De esta manera se dió por válida la función (2) que indica la variación de la resistencia interna para el secado de pimiento con el contenido de agua cuando se realiza el secado de una muestra cuya disposición en el secadero de la-

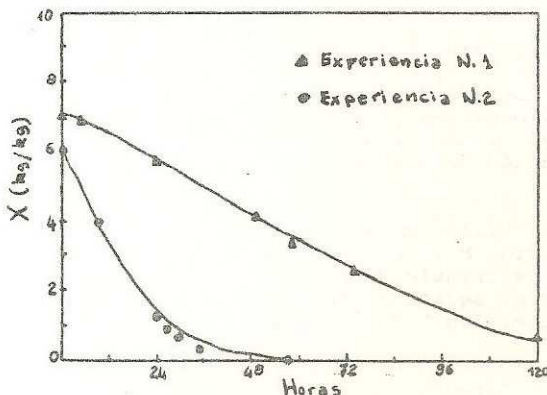


Fig. 7 - Curva de secado

boratorio es representativa de aquella utilizada en la escala real.

(no publicado).

Conclusiones

Los principales puntos a señalar son:

1. El secadero cumple bien su función de producir un fruto seco y limpio.
2. El tiempo de secado ha sido del orden de los 4 a 5 días. Se espera mejorar un poco esta cifra, ya que aún se puede aumentar en algunos grados la temperatura de salida del colector sin perjudicar el pimiento.
3. Las mejoras introducidas en los extremos del colector, permiten un armado rápido por parte de personal sin experiencia, lo que cumple el propósito de disponer de un sistema de mantenimiento y armado sencillo que no requiera de mano de obra especializada.
4. Las experiencias realizadas, indican que el fruto debe llegar con cierta uniformidad, puesto que si se ponen sin luz en el túnel, los pimientos verdes no cambian de color. Esto requiere una recolección más uniforme. Otra alternativa sería la de realizar un presecado en un secadero pasivo de los frutos verdes, antes de entrar a secar en el túnel.
5. El programa de simulación del colector da resultados en buen acuerdo con las experiencias.

Referencias

1. Saravia, L.; Echazú, R.; Guerrero, F.; Gramajo, C.; García, M.; Fabris, A.: "Secado de pimientos. Ensayos preliminares, construcción y ensayo de una planta piloto"; 8a. Reunión de ASADES, 1-7, 1983.
2. Passamai, V.; Morhenne, J.; Leiner, W.; Fiebig, M.: "Función empírica para la transferencia de masa durante el secado de tabaco Virginia", Cem.-Ing.Tech.56(1984) N° 10, 775-777.
3. Passamai, V.; Saravia, L.; Cadena, C.; Caso, R.: "Secadero experimental de tabaco", Salta, 1982