

"MODULO PARA SECADO SOLAR ACTIVO CON  
ACUMULACION DE CALOR"

A. Iriarte\*, J.R. Sequi y S.B. de Biagi  
INENCO, Unidad de Investigación Catamarca  
Facultad de Ciencias Agrarias-UNCa.  
C.C. 189-4700 - Catamarca

RESUMEN

El presente trabajo muestra las características de diseño, construcción y los resultados experimentales del ensayo de un prototipo de secadero solar activo, con lecho acumulador de calor. En el mismo se fijaron como condiciones especiales la necesidad de una construcción simple, de bajo costo, utilizando materiales accesibles para la región de destino y con una técnica constructiva acorde con la capacidad de mano de obra local.

El prototipo de características modular para permitir su reproducción en tantas unidades como sea necesario y de acuerdo a la cantidad de materia a procesar.

El ensayo se realizó secando zanahoria cortada en rodajas de 2 mm de espesor, producto fácil de conseguir en el medio para la época en que fué realizada la experiencia. El objeto fundamental fue evaluar el funcionamiento integral del secadero desde el punto de vista del diseño y del comportamiento térmico más que el producto específico a secar.

1.- Introducción

El Dpto. Santa María está situado en la región Noroeste de la Provincia de Catamarca; en el extremo sur del Valle Calchaquí la fertilidad del suelo, sus características agroclimáticas favorables y su rápida conexión con centros de consumo importantes como Tucumán y Salta la destacan dentro del contexto provincial como una de las regiones con reales posibilidades del proyectarse como un polo de desarrollo agrícola de envergadura.

Su principal actividad ha estado orientada a la producción de pimiento para pimentón, cultivo este tradicional de los Valles Calchaquíes que se extienden desde el Noroeste Catamarqueño hasta la provincia de Salta y que en el caso de Santa María representa aproximadamente el 50% de la producción en el País. No obstante ello, en los últimos años se ha puesto en evidencia la necesidad de mejorar el sistema productivo debido a la paulatina caída de los rendimientos que se registran. Para ello se debe actuar tanto en lo que respecta al manejo del cultivo en sí como en lo referente al tratamiento del producto post-cosecha, a los fines de poder competir en cantidad y calidad con los exigentes mercados internacionales.

Además del pimiento pimentonero, otros cultivos de significativa demanda y valor comercial se están extendiendo a lo largo de los Valles Santamarianos que, al igual que aquél, necesitan ser deshidratados para su posterior procesamiento y comercialización (comino, anís, orégano, higo para pasa, hortalizas, etc.).

\* Miembro de la carrera de Investigador del CONICET

# Convenio UNCa. - UNSa. - CONICET

\*\* Financiado Gobierno de Catamarca

De allí el interés puesto de manifiesto por las autoridades provinciales, municipales y productores del medio por atender las necesidades científicas-tecnológicas del aparato productivo que les permita la evolución socio-económica efectiva de esta región. Prueba de ello lo constituye el "Convenio" suscripto entre el Poder Ejecutivo Provincial, la Universidad Nacional de Catamarca y la Municipalidad de Santa María, donde las partes se comprometen a realizar acciones conjuntas con el fin de propender al desarrollo integral del Departamento.

Este trabajo forma parte de uno de los proyectos específicos incluidos en el marco de dicho "Convenio" y está destinado a mejorar los sistemas actuales de secado, que incluyen el tradicional secado en "Canchas" al aire libre, por nuevos métodos más tecnificados que reduzcan las pérdidas de producto, disminuyen los costos de producción y mejoren la calidad final acorde a los requerimientos de los consumidores.

## 2.- Cálculo de prediseño

El prototipo ensayado fue diseñado de forma modular tratando de conseguir una unidad integrada de secado con una óptima relación entre el área de colección-acumulación y el volumen de producto a secar. Esto además debía compatibilizar con el costo final del secadero, para lo cual era fundamental ajustar las dimensiones a las reales necesidades desde el punto de vista térmico y sustituir, en lo posible los materiales convencionales por otras alternativas más económicas.

A fin de ajustar las proporciones entre el área de colección y volumen a secar se hizo un cálculo teórico previo tomando como producto la zanahoria por ser ésta factible de conseguir en esa época para hacer los ensayos prácticos de comparación.

En el cálculo se fijaron algunos parámetros, a saber:

Cantidad de producto a secar (Mi) = 21 kg.

Tiempo de secado (ts) = 20 hs. solares

% de humedad del producto al inicio de la experiencia (Mi) = 89%

% de humedad del producto al final de la experiencia (Mf) = 5%

En base a estos datos se calculó la velocidad promedio de secado

$$V_s = \frac{M_i}{t_s} = \frac{21 \text{ kg}}{20 \text{ hs}} = 1,05 \text{ kg/hs.}$$

La velocidad promedio de extracción de agua es:

$$V_r = V_s \frac{(M_i - M_f)}{(100 - M_f)} = 0,92 \text{ kg/h}$$

El contenido de humedad promedio, Xa del aire ambiente, para una humedad relativa, Hr, del 30% y una temperatura promedio ambiente Ta de 25°C es:

$$X_a = 6 \text{ gr/kg de aire seco}$$

El contenido de humedad del producto final es:

$$X_f = \frac{M_f \cdot 100}{100 - M_f} = \frac{5 \cdot 100}{100 - 5} = 5,26\%$$

La humedad de saturación del producto (Hrs) se puede aproximar de la curva de sorción - desorción para la zanahoria.

$$H_{rs} = 45\%$$

Con esto podemos calcular la humedad de equilibrio media:

$$H_{rm} = 72,5\%$$

Usando la curva psicométrica podemos inferir la humedad del producto, con una temperatura media de 50°C:

$$X_s = 15,5 \text{ gr de agua/kg de aire seco.}$$

Con estos valores podemos calcular el flujo de aire necesario para el secado:

$$D_s = 1000 \cdot \frac{V_h}{1.2 (X_a - X_s)} = 80,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Las entalpías del aire de entrada y salida son:

$$h_a = 39,91 \text{ kJoul/kg}$$

$$h_s = 64,79 \text{ kJoul/kg}$$

La potencia requerida es:

$$P_n = 1.2 \frac{(h_s - h_a)}{3600} \cdot D_s = 1.2 \cdot 80,7 = 0,67 \text{ kw}$$

La energía total necesaria durante el período ts de:

$$E_n = P_n \cdot t_s + 0,67 \times 20 = 13,4 \text{ kw.h}$$

Considerando una radiación R = 0,6 KW/m<sup>2</sup> y una eficiencia de colector N = 0,4, la superficie de colección necesaria es:

$$A_c = \frac{P_n}{N \cdot R} = \frac{0,67}{0,4 \cdot 0,6} = 2,74 \text{ m}^2$$

Sobre esta base se dedicó dimensionar el prototipo experimental. Como en el cálculo no se tubo en cuenta el aporte nocturno del lecho, se consideró conveniente reducir el área de colección en un 10%.

## 3.- Características constructivas y de diseño

A los fines de su descripción, el prototipo puede dividirse en dos partes, una frontal que incluye el sistema de colección y acumulación y una posterior que constituye el recinto de secado propiamente dicho y que aloja en su base inferior la bomba de impulsión de aire caliente. Toda la estructura de soporte del conjunto está construida en mampostería de suelo-cemento de 17 cm de ancho, material ya utilizado en trabajos anteriores y que ha mostrado sus bondades de resistencia, su bajo costo en comparación con otros materiales tradicionales como el ladrillo y el cerámico hueco, debido al bajo porcentaje de cemento que utiliza (12%) y su fácil construcción en el medio rural.

La parte frontal de forma prismática triangular presenta una cara superior inclinada a 35 grados con respecto al plano horizontal y recubierta por una superficie vidriada de 3 mm de espesor. Inmediatamente por debajo de ésta se ubica una estructura rectangular de chapa galvanizada pintada de negro mate montada sobre cuatro correderas que permite acercarla o alejarla de la anterior. De esta forma se consigue variar la sección del ducto de circulación del aire de aumentar o disminuir su velocidad.

Por debajo de esta estructura el área de colección se cierra con una placa semi-aislante de caña, con torteado de barro en su parte superior y una lámina de plástico en la parte inferior que impide las filtraciones de aire.

A 10 cm por encima de la base y sobre una parrilla de hierro de 10 mm de diámetro se dispone el lecho acumulador, de 65 cm de espesor, constituido por piedras de aproximadamente 8 cm de diámetro. El espacio comprendido entre la base y el lecho constituye el ducto de retorno del aire, el cual puede ser guiado por una pantalla de comando exterior para que atraviese dicho lecho y/o circule por el colector. En el extremo más frontal se encuentran las tomas de aire, una a cada lado del secadero y a una altura de 50 cm del nivel del piso para evitar la entrada de tierra. Una pantalla corrediza permite variar el caudal de aire hacia el interior y para lograr una distribución uniforme es conducido por un caño de PVC de 10 cm de diámetro y perforado en todo el ancho enfrentado por una placa colectora.

Un muro de piedra de 30 cm de espesor separa la parte frontal de la posterior, dejando en la parte superior las ventanas de pasaje de

aire, tanto del proveniente de la placa colectora como del lecho acumulador. Estas ventanas pueden cerrarse o abrirse a voluntad mediante simples pantallas. En la parte inferior del muro se encuentra el orificio de pasaje del aire de retorno impulsado por la bomba.

El recinto de secado propiamente dicho contiene las bandejas con tenedoras de producto, de 1 m x 1 m separadas 20 cm entre sí. Las mismas se introducen por una puerta ubicada en la pared posterior / del módulo, convenientemente aislada con lana de vidrio para evitar la fuga de calor. El techo de este recinto está constituido de caña cubierta con troteado de barro, una placa aislante de poliuretano y una lámina de plástico para evitar las filtraciones de agua en caso de lluvia.

En la base del recinto se ubica la bomba de impulsión, accionada por un motor eléctrico de 0.2 HP. De esta manera el aire es aspirado a la salida de las bandejas e impulsado a circular por los ductos correspondientes hacia la parte frontal.

Una toma de aire de 10 cm de diámetro se ubica sobre la pared posterior a 40 cm por encima del nivel del piso, y se utiliza para / el ingreso de aire en la operación nocturna.

#### 4.- Esquema de funcionamiento

En realidad puede tener distintas alternativas en función de la mayor o menor apertura que se realice sobre c/u de las pantallas y ventanas, pero básicamente las podemos diferenciar en dos posiciones fundamentales: una para operación diurna y otra nocturna.

En la primera (fig. N° 1), abiertas las bocas de entrada (T1) y (T2) según la posición más conveniente en relación al caudal necesario, el aire asciende por el colector elevando su temperatura. Por / la ventana (V1) ingresa al recinto de secado y después de atravesar / las bandejas es tomado e impulsado por el ventilador nuevamente hacia la parte frontal. Si la pantalla (P1) está totalmente cerrada, / el aire es obligado a atravesar el lecho de piedras calentándolo. Como la ventana (V2) está cerrada, sale al exterior por la chimenea / (C).

Esta posición se usa para las horas de máxima radiación y cuando el producto está en su primera etapa de secado, donde el aire se carga con un alto porcentaje de humedad no siendo conveniente recircularlo. Cuando el aire no alcanza la temperatura ideal (primeras horas de la mañana y últimas de la tarde) y siempre que el porcentaje de humedad no sea elevado, conviene abrir la pantalla (P1) a una posición intermedia y cerrar un poco la chimenea (C) para favorecer un tanto la recirculación y no enfriar mucho el lecho. En todos los casos la toma (T3) está cerrada.

En la segunda posición (Fig. N° 2) se cierran las tomas (T1) y (T2), la ventana (V1) y la pantalla (P1). Se abren la toma (T3) a una posición intermedia (V2).

De esta forma el aire es impulsado a través del lecho e ingresa por (V2) al recinto de secado. Parte del mismo se elimina por la chimenea (C) parcialmente abierta e ingresando una proporción similar por T3.

#### 5.- Ensayo experimental

Con el objeto de evaluar el funcionamiento integral de prototipo y comprobar la correlación entre el cálculo teórico y la experiencia práctica se realizó un ensayo secando zanahoria. En este caso se trató de reproducir los mismos parámetros básicos fijados para el cálculo, a saber:

Cantidad de producto a secar (M<sub>i</sub>) = 21 kg

Tiempo de secado (T<sub>s</sub>) = 20 hs. solares

Los 21 kg de zanahoria se cortaron en rodajas de aproximadamente 21 mm de espesor y repartidas en tres bandejas de 1 m x 1 m cada una.

El porcentaje de humedad del producto se obtuvo tomando 5 muestras y secando en estufa a 105°C hasta paso constante.

Posteriormente se realizaron otros dos ensayos con el mismo producto variando solamente los kilos de zanahoria a secar para evaluar el comportamiento del secadero para distintas cargas y analizar los aportes realizados por el lecho.

Los resultados de los tres ensayos se muestran en la tabla N° 1, donde se advierte que en el primer ensayo, el aporte real del lecho como calor útil para secado está en el orden de un 34%, lo cual significa un porcentaje de evaporación del 23% respecto de lo evaporado durante el día y un 19% del total de agua perdida durante la experiencia.

Cabe destacar que el ensayo debió suspenderse a las 44 horas por precipitarse un cambio desfavorable en las condiciones climáticas que podía alterar la normalidad del proceso, considerándose que el tiempo transcurrido hasta ese momento era válido para el análisis.

En el segundo ensayo el grado de aporte del lecho como calor útil es del 21,6%, constituyendo a la evaporación de un 15% respecto de la diurna y a un 13% del total de la experiencia. Esto es lógico puesto que la masa a secar era mucho mayor.

En el tercer ensayo se observa que el porcentaje de humedad del producto después de 24 hs. de secado es elevado (31%) teniendo en cuenta el volumen de producto inicial. Además se verificó un secado no uniforme como consecuencia del escaso material distribuido en cada bandeja.

La fig. N° 3 muestra los valores correspondientes a las temperaturas de entrada y salida del colector para el segundo ensayo, como así también los valores de radiación correspondiente a ese período. En la curva representativa de la temperatura de salida, a la hora 18 se acopla la de salida del lecho, puesto que en ese momento se abre la ventana V2 y se cierra la V1.

La figura N° 4 muestra la variación de la temperatura a nivel de cada bandeja contenedora, para todo el período de secado del segundo ensayo. En ellas podemos observar que durante el primer día solar es la primer bandeja la que absorbe la mayor cantidad de calor del aire produciéndose una significativa diferencia de temperatura respecto / de la segunda y tercera. En el segundo día, como consecuencia de la mayor evaporación de la primer bandeja y de entrar en régimen el sistema, las otras dos se acercan aunque la tercera muestra una notable diferencia respecto de la primera.

La fig. N° 5 muestra la variación del contenido de humedad en el producto respecto de la masa seca, para los tres ensayos. En ellos / se puede observar la respuesta favorable del primer ensayo, donde en las primeras seis horas solares pierde la mayor parte de la humedad y en las catorce horas siguientes, con el aporte del lecho, se registra otra significativa reducción de la humedad.

La fig. N° 6 muestra la inversa de la relación de secado obtenida mediante el cociente:

$$p = \frac{\text{peso final}}{\text{peso inicial}} \text{ para los tres ensayos.}$$

En las mismas se verifica la misma tendencia que en la figura anterior.

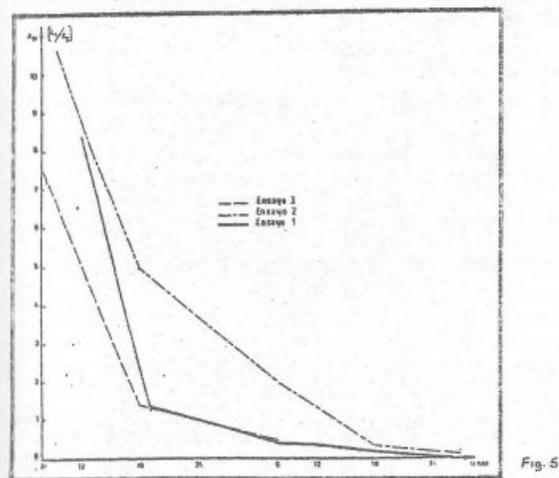
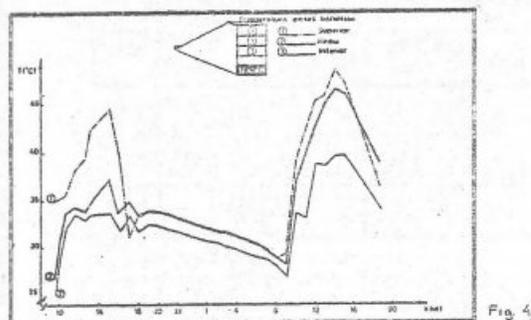
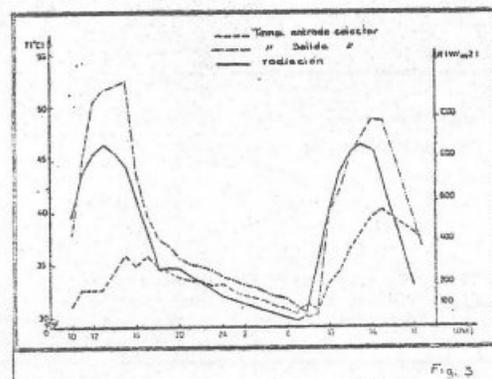
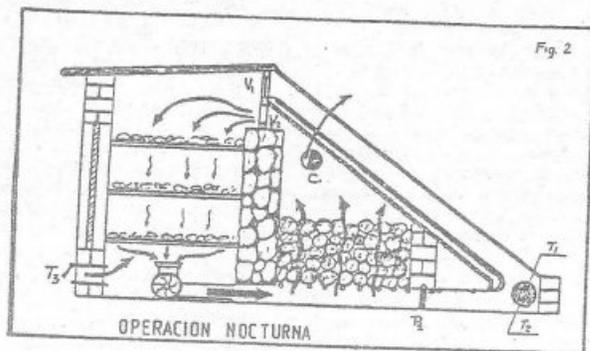
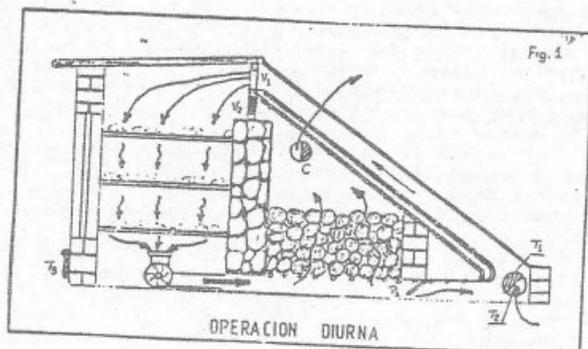
#### 6.- Conclusiones

Del análisis de los resultados, se puede observar que el método utilizado para calcular la superficie de colección en función de la cantidad de producto a secar, a pesar de ser de aproximación, se corresponde bastante con los resultados experimentales. El primer ensayo, realizado sobre la base los valores del prediseño, que el que dio mejores resultados.

El lecho de piedra cumplió con el objetivo provisto de mantener con el proceso durante la noche, haciendo un aporte significativo de calor para evitar que el sistema se enfrié demasiado. Haciendo algunas modificaciones, principalmente respecto de la conducción del aire aumentando el volumen del lecho, se puede conseguir un mejor apro

vechamiento del mismo.

Otro aspecto que deberá tenerse en cuenta en el futuro es la circulación de aire a través de las bandejas, tratando de evitar el intercambio de las mismas y determinando el espesor óptimo de capa de producto por cada una. En este caso sería conveniente poder invertir la dirección del flujo de aire durante el sacado de aire nocturno, cambiando la posición de la bomba de impulsión.



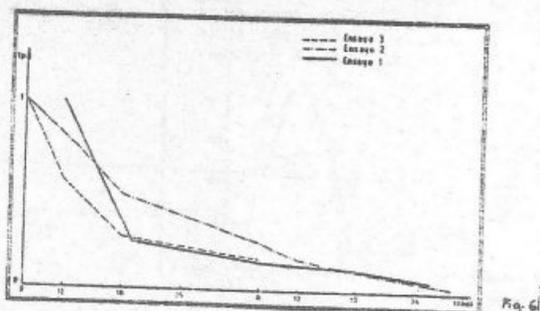


Tabla: Nº 1

t <sub>h</sub>	carga m <sub>i</sub> (kg)	H <sub>i</sub> %	m <sub>f</sub> (kg)	H <sub>f</sub> %	H <sub>2</sub> O diur.	H <sub>2</sub> O noct.	Ve (kg/h)	Q <sub>i</sub> (H.J.)	Q <sub>v</sub> (H.J.)	At %
1	44	89	2,6	11,5	14,9	3,5	0,42	18,5	54,0	34,2
2	48	89	4,4	19	26,2	4	0,64	19,2	68,7	21,64
3	24	89	2,6	31	11,9	1,7	0,57	10,3	39,9	25,8

m <sub>i</sub> :	masa cargada de producto
m <sub>f</sub> :	" " final del producto
H <sub>i</sub> :	grado de humedad inicial del prod.
H <sub>f</sub> :	" " " " final " "
H <sub>2</sub> O diurna :	kg de agua evaporada intervalo diurno
H <sub>2</sub> O noct. :	" " " " " " nocturno
Ve :	pérdida de agua promedio
Q <sub>i</sub> :	cantidad de calor suministrada por el lecho de piedra
Q <sub>v</sub> :	" " " " utilizada en la extracción de agua
At :	aporte porcentual del lecho de piedra en el Q <sub>v</sub>