

MEJORAS Y VALIDACION DE UN MODELO DE SECADO CON RADIACION

Víctor Passamai*

Luis Saravia†

INENCO‡

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177

4400 - Salta

Tel. (087) 255389-e-mail: passamai@ciunsa.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta la formulación de un modelo de secado solar para pimiento *cortado*, en dos variedades, *morrón* y *largo*, producido a partir de mejoras que fueron introducidas en un modelo anterior [3].

Se estudia la influencia de la velocidad del aire y se valida con experiencias de secado en pequeña escala, realizadas en un prototipo de colector-secador que funciona en condiciones *reales* de campo.

INTRODUCCION

Considerando un masa de agua que se evapora en contacto con aire en movimiento y que además recibe radiación que incide sobre la superficie libre, si se mantienen condiciones de estado estacionario, el calor latente de evaporación será aportado por la transferencia hacia el líquido desde sus alrededores, es decir por la radiación y el transporte convectivo:

$$\lambda n = I + q. \quad (1)$$

En (1) λ es el calor latente de vaporización, n la densidad superficial de flujo de masa evaporativo, I la radiación neta que recibe la superficie y $q = h(T - T_{ag})$ es el aporte convectivo por unidad de superficie desde el aire. En esta última T es la temperatura del aire, T_{ag} la temperatura en la interfase agua-aire y h el coeficiente convectivo global de la transferencia de calor.

Con la introducción del potencial de evaporación dado por $n = h_m(\rho_{vs} - \rho_v)$, la expresión aproximada de la densidad del vapor, $\rho_v \approx 0,622\rho P_v/P$ y la hipótesis de linealidad de la presión de vapor en la superficie de agua alrededor de la temperatura del aire, dada por

$$P_s(T_{ag}) = P_s(T) - \frac{dP_s}{dT} |_T (T - T_{ag}),$$

*Facultad de Ciencias Exactas, Consejo de Investigación de la UNSa

†Facultad de Ciencias Exactas, Investigador del CONICET

‡Instituto UNSa-CONICET

donde $P_s(T)$ se supone igual a la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire; se llega a la ecuación de Penman, desarrollada en [3], que permite calcular la velocidad de evaporación de agua con radiación:

$$n = k_1[P_s(T) - P_v] + k_2I. \quad (2)$$

Tanto k_1 como k_2 están expresadas en términos de los coeficientes de transporte, el calor latente, la densidad del aire húmedo y la presión total del lugar, que actúan como parámetros.

La influencia de la velocidad del aire, v , se pone igualmente de manifiesto, a través de los coeficientes de transferencia, en la ecuación de Penman. En el trabajo citado anteriormente, dicha influencia se expresó de la forma

$$k_1 = kv$$

basada únicamente en la hipótesis de Dalton [4].

Por otro lado, la ecuación fenomenológica que permite determinar la velocidad de pérdida de agua de pimientos bajo radiación surge a partir de la introducción de *resistencias globales* que dependen del *contenido de agua en base seca*, X , y que afectan tanto al potencial de presión ($P_s - P_v$) como a la radiación I . Consecuentemente, estas resistencias se indican con los subíndices p e i respectivamente: $r_p(X)$ y $r_i(X)$.

Hasta aquí entonces, la ecuación de "Dalton-Penman" de la velocidad de pérdida de agua del producto se escribía de la forma:

$$n = \frac{(P_s - P_v)v}{r_p(X)} + \frac{I}{r_i(X)}. \quad (3)$$

MEJORAS DEL MODELO

Dado que en la ecuación (2)

$$k_1 = \frac{h}{\lambda(\Delta + \gamma)}, \quad \text{con } \Delta = \frac{dP_s}{dT} |_T \quad \text{y} \quad \gamma = \frac{Ph}{0,622\lambda\rho h_m};$$

y como para determinar h puede usarse la analogía de Chilton y Colburn [2] entre las transferencias convectivas de calor y masa, lo que lleva en definitiva a que h es proporcional a una potencia de la velocidad distinta de la unidad, mientras que la relación entre h y h_m , está dada por $h/h_m = \rho c_p Le^{2/3}$ [1], donde $Le = \alpha/D$ es el número de Lewis, resulta que $k_1 = k'_1 v^\alpha$ donde α es un coeficiente que puede determinarse experimentalmente, lo mismo que k'_1 .

Por su parte, el coeficiente k_2 resulta ser:

$$k_2 = \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)},$$

de modo que no depende de la velocidad del aire.

Estas consideraciones, válidas para la evaporación de agua, permitieron reformular la ecuación fenomenológica del secado de la siguiente forma:

$$n = -\frac{m_s dX}{A dt} = \frac{(P_s - P_v)v^\alpha}{r_p(X)} + \frac{I}{r_i(X)}. \quad (4)$$

Por otro lado, como veremos en la próxima sección, al buscar $r_i(X)$ para el caso de pimientos, se encontró que no existía correlación salvo para las experiencias cuya velocidad del aire era de 1 m/s, esto llevó a introducir en la ecuación (4) una dependencia potencial con la velocidad para el coeficiente k_2 , como se hizo con k_1 : $k_2 = k'_2 v^\beta$. En definitiva, el modelo mejorado de secado para pimientos se describe mediante la siguiente expresión:

$$n = -\frac{m_s dX}{A dt} = \frac{(P_s - P_v)v^\alpha}{r_p(X)} + \frac{v^\beta I}{r_i(X)}. \quad (5)$$

EVALUACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Se realizaron experiencias de secado en cámara oscura para determinar $r_p(X)$ a partir de la expresión

$$\frac{1}{r_p(X)} = -\frac{m_s dX}{A dt} \frac{1}{\Delta P v^\alpha}.$$

El parámetro α se obtuvo de igualar r_p entre dos experiencias, suponiendo que, en *condiciones constantes* de secado,

$$-\frac{dX}{dt} = k(X - X_e),$$

donde X_e es el contenido de humedad del producto de *equilibrio*. Como

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\alpha = \frac{k_1 \Delta P_2}{k_2 \Delta P_1}$$

donde k_1 y k_2 son los coeficientes obtenidos para k en dos experiencias 1 y 2, respectivamente, se despejó α resultando igual a 0,483. Luego se obtuvo, para pimiento morrón:

$$r_p(X) = \frac{10^9}{1,65(X - 1,3)} \left(\frac{m}{s}\right)^{1,483}, \quad (6)$$

con $1,3 < X < 12$.

Introduciendo $r_p(X)$ se pudo calcular $r_i(X)$ en base a los datos de experiencias realizadas bajo radiación, mediante la expresión:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_i(X)} &= \frac{1}{I} \left(-\frac{1}{a} \frac{dX}{dt} - \frac{\Delta P v^{0,483}}{r_p(X)} \right) = \\ &= \frac{1}{I} \left[\frac{k(X - X_e)}{a} - \Delta P v^{0,483} (1,65 \times 10^{-9} (X - 1,3)) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

en la que los datos de temperatura fueron alisados mediante el cálculo de los promedios.

Como se dijo, al graficar se observó que no existe correlación entre $1/r_i$ y X , salvo para las experiencias cuya velocidad del aire era de 1 m/s (Figura 1).

De estas experiencias se obtuvo la siguiente correlación para $r_i(X)$, válida para todo β , aplicando la relación (7):

$$r_i(X) = \frac{10^9}{8,29X + 3,83} \left(\frac{m}{s}\right)^{\beta+2}, \quad (8)$$

con el mismo rango de validez para X que el anterior.

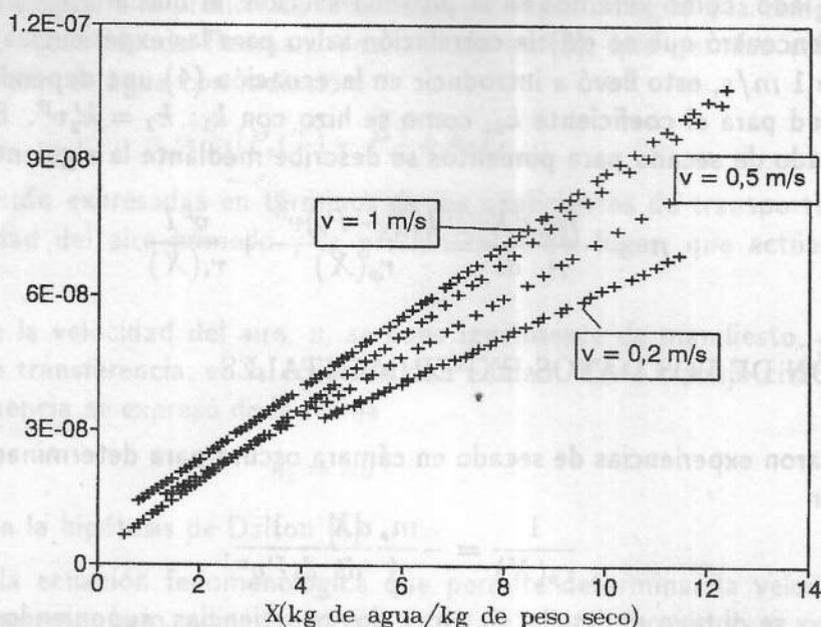


Figura 1: Correlación para la función $1/r_i(X)$ en el caso $v = 1 \text{ m/s}$ y dispersión cuando las velocidades del aire son distintas.

Con las otras experiencias se buscó β de modo que $r_i(X)$ fuera coincidente con la anterior, obteniéndose $\beta = 0,2$. Esto se observa en la Figura 2, que muestra superpuestas las relaciones halladas para $1/r_i(X)$ a partir de los datos, junto con la expresión

$$\frac{1}{r_i(X)} = 1 \times 10^{-9} (8,29X + 3,83) \left(\frac{s}{m}\right)^{2,2}.$$

Para el cálculo de $r_p(X)$ y $r_i(X)$ en el caso de *pimientos largos*, variedad que tiene un espesor menor que el pimiento morrón, se supuso que los exponentes α y β son los mismos por ser responsables de un efecto *superficial* de la velocidad del aire. Con ello los resultados obtenidos fueron:

$$r_p(X) = \frac{10^9}{1,44X + 0,18} \left(\frac{m}{s}\right)^{1,483}, \quad (9)$$

y

$$r_i(X) = \frac{10^8}{1,13X - 0,44} \left(\frac{m}{s}\right)^{2,2}, \quad (10)$$

con $0,16 < X < 10$.

VALIDACION CON EXPERIENCIAS DE CAMPO

Para realizar la validación del modelo de laboratorio, se realizaron dos diseños de experiencias de secado al aire libre, bajo la acción de la radiación solar. En ambos casos se construyó un colector de aire sencillo para calentar el aire ambiente e introducirlo a la cámara de secado. Esta permitía el ingreso de energía solar sobre la bandeja de producto, reemplazándose así a la lámpara usada en el laboratorio.

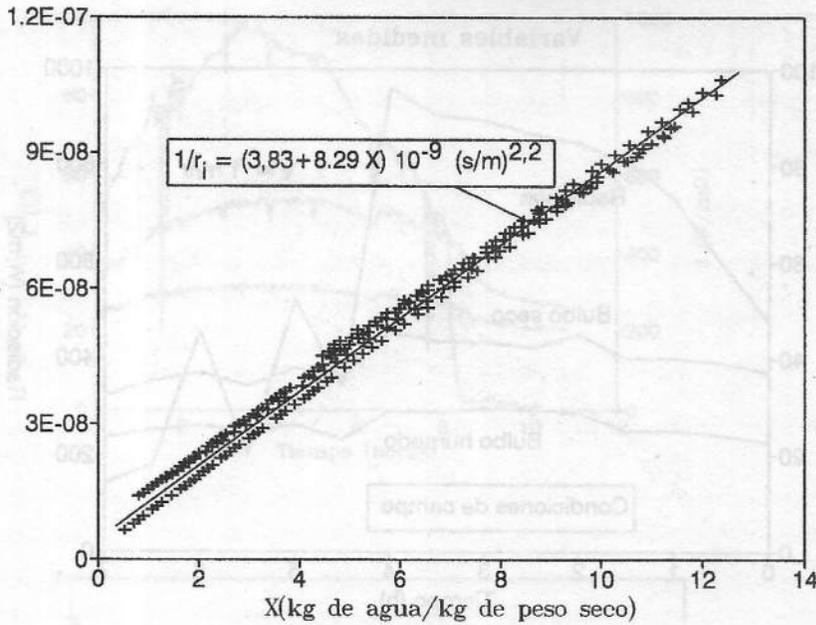


Figura 2: Correlación $1/r_i(X)$ para el secado de pimienta morrón con radiación, mediante el agregado del coeficiente v^β .

Una de las experiencias de campo para el caso de pimienta morrón dio como resultado el que se muestra en la Figura 3, para cuyo caso el error promedio de la simulación fue del 5 %. Datos tomados para experiencias de secado en campo con pimienta largo mostraron resultados similares al anterior (Figura 4).

CONCLUSIONES

El modelo de secado con radiación para pimienta, en dos de sus variedades, se puede expresar mediante una ecuación de tipo general dada por

$$n = -\frac{m_s dX}{A dt} = \frac{(P_s - P_v)v^{0,483}}{r_p(X)} + \frac{v^{0,20}I}{r_i(X)} \quad (11)$$

Esta incluye la influencia de la velocidad del aire de secado en forma explícita, debiéndose determinar $r_p(X)$ y $r_i(X)$ para cada caso particular. Para pimienta morrón y largo, *partidos*, las mismas están dadas en este trabajo.

La expresión de la cinética de secado es de interés para simular el funcionamiento de equipos de secado de campo, tal como secadores-invernaderos, que permiten el ingreso de radiación directamente sobre el producto.

El modelo desarrollado permite la simulación del secado con radiación cuando se conocen las variables *externas* al producto (presión total del lugar, velocidad del aire, temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire y radiación).

En el laboratorio es posible la realización de dos o tres experiencias de secado, dentro del rango de valores de temperaturas, velocidad del aire y radiación que se espera tener en

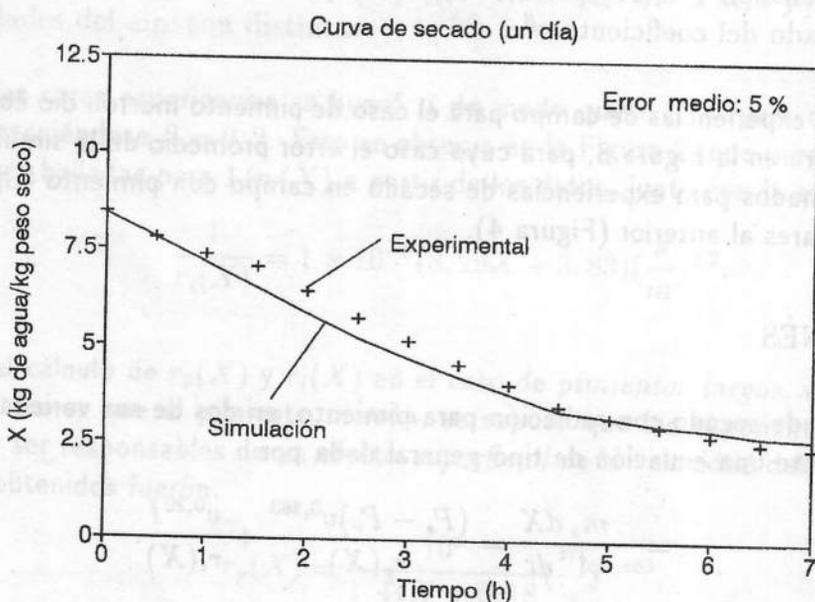
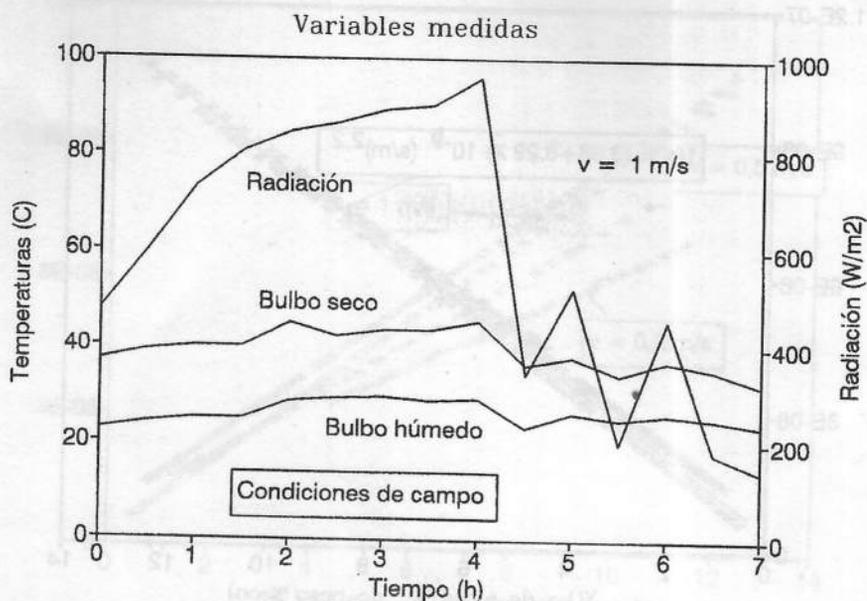


Figura 3: Condiciones de una experiencia de campo con pimiento morrón y curva de secado.

la escala real, para obtener un modelo matemático fiable con el objeto de realizar simulaciones por computadora.

NOMENCLATURA

$a = A/m_s$, área de producto por unidad de masa seca, m^2/kg

A = área superficial, m^2

$\alpha = k/(\rho c_p)$ = difusividad térmica, m^2/s

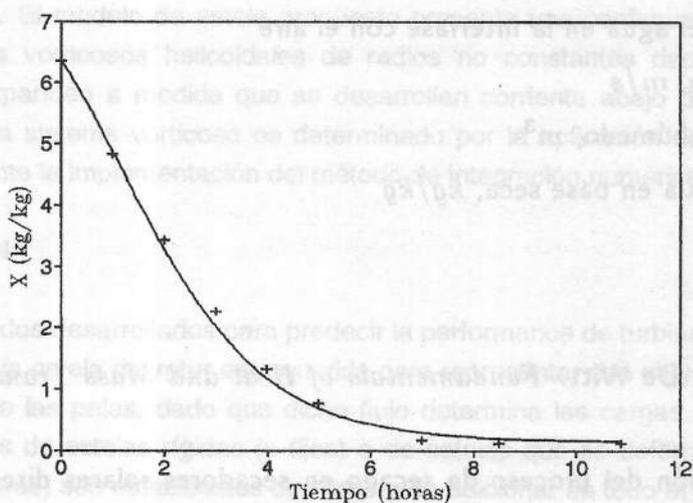
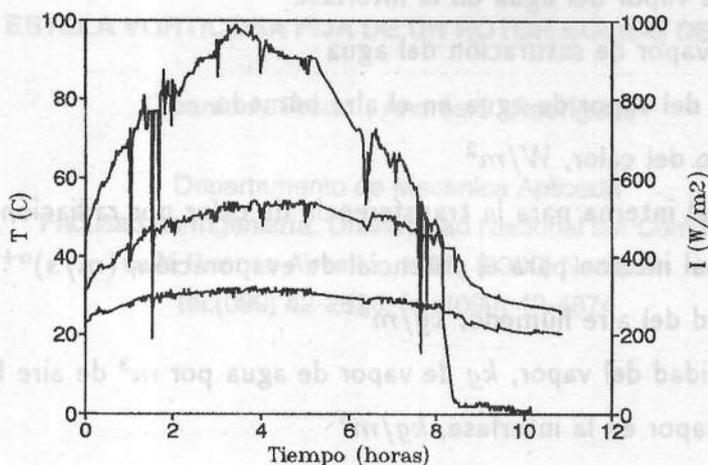


Figura 4: Gráficas del secado en campo para una experiencia con pimienta larga.

c_p = calor específico del aire húmedo a presión constante, $J/(kg K)$

D = coeficiente de difusión (difusividad másica), m^2/s

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor, $W/(m^2K)$

h_m = coeficiente convectivo de transferencia de masa, m/s

I = radiación neta incidente sobre la superficie, W/m^2

k = coeficiente de proporcionalidad, $1/s$

λ = calor latente de vaporización del agua, J/kg

m = masa de aire húmedo, kg

m_{ag} = masa de agua, kg

m_s = masa seca de producto, kg

$n = -\frac{1}{A} \frac{dm_{ag}}{dt}$ = densidad de flujo de difusión del agua o velocidad de evaporación específica, $kg/(s m^2)$. Para el caso del secado, n debe reemplazarse por $-m_s \frac{1}{A} \frac{dX}{dt}$.

P = presión total del aire húmedo, Pa

$P_s(T_{ag})$ = presión de vapor del agua en la interfase

$P_s(T)$ = presión de vapor de saturación del agua

P_v = presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo

q = densidad de flujo del calor, W/m^2

r_i = resistencia global interna para la transferencia de calor por radiación, $(m/s)^{\beta+2}$

r_p = resistencia global interna para el potencial de evaporación, $(m/s)^{\alpha+1}$

ρ = m/V = densidad del aire húmedo, kg/m^3

ρ_v = m_{ag}/V = densidad del vapor, kg de vapor de agua por m^3 de aire húmedo

ρ_{vs} = densidad del vapor en la interfase, kg/m^3

t = tiempo, s

T = temperatura de bulbo seco del aire, K

T_{ag} = temperatura del agua en la interfase con el aire

v = velocidad del aire, m/s

V = volumen de aire húmedo, m^3

X = contenido de agua en base seca, kg/kg

REFERENCIAS

1. F. P. Incropera y D. P. De Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 1990.
2. V. Passamai. Modelación del proceso de secado en secadores solares directos. *Tesis Doctoral, Salta*, 1995.
3. V. Passamai y L. Saravia. Formulación de un modelo de secado solar a partir de estudios de evapotranspiración. *ASADES, Rosario*, 1994.
4. E. Vergara. *Química General. Elementos de Físicoquímica*. Tomo II. UNT, 1970.

NOMENCLATURA