

FORMULACION DE UN MODELO DE SECADO SOLAR A PARTIR DE ESTUDIOS DE EVAPOTRANSPIRACION

Víctor Passamai*

Luis Saravia†

INENCO‡

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177

4400 - Salta

Te/Fax (087) 251034

RESUMEN

En este trabajo se relacionan el *proceso de secado* con el de *evaporación de agua*, pues ambos implican un *transporte de energía* desde el medio ambiente, lo que provoca una *migración del agua* contenida en el producto o en una bandeja con agua hacia la superficie interfásica. Para los dos sistemas existe un mecanismo de *transferencia de masa* que se mantiene por el *acoplamiento de los transportes de calor y materia*.

El fenómeno de evaporación de agua fue estudiado inicialmente por Dalton en 1788 [2, 7], Lewis en 1922 [4] y se encuentra descrito en textos más recientes, como los de Threlkeld [6], el libro de la ASHRAE [1] o el de Jones [3]. Su importancia es doble: por un lado sirve de referencia para la verificación del equipo de laboratorio en cuanto a su utilidad para el seguimiento del secado; y por el otro permite vincularlo con el modelo de secado que se busca desarrollar si se introduce una *resistencia interna* que se hace cargo de los distintos mecanismos microscópicos que intervienen en este otro proceso.

Se estudia primeramente la evaporación incluyendo la acción de radiación incidente sobre masas de agua depositadas sobre una bandeja de pequeña profundidad. A continuación se aplica el resultado obtenido al secado de pimientos, mediante la introducción de una resistencia interna y un término adicional que incluye la radiación incidente sobre el producto.

DEFINICIONES BASICAS

Las siguientes definiciones son de utilidad para el desarrollo de las secciones que vienen, por lo que se incluyen aquí en forma resumida, pudiéndose ampliar con la consulta de la bibliografía [8, 5].

Resistencias de transporte. Las ecuaciones básicas que describen los fenómenos de transporte tienen la forma general:

*Facultad de Ciencias Exactas

†Facultad de Ciencias Exactas, SAPIU-CONICET

‡Instituto UNSa-CONICET

flujo = coeficiente de difusión × gradiente

como es el caso de la Ley de Fick para la difusión o de Fourier para la conducción térmica, respectivamente:

$$n = -D \frac{d\rho_v}{dz}, \quad q = -k \frac{dT}{dz} = -\alpha \rho c_p \frac{dT}{dz}.$$

Considerando flujo unidimensional, se pueden aplicar estas leyes en forma integral cuando el gradiente es difícil de calcular en un punto. Como normalmente ese es el caso, resulta conveniente reemplazarlas por las siguientes expresiones:

$$n = \frac{\rho_v(z_1) - \rho_v(z_2)}{\int_{z_1}^{z_2} dz/D} \quad \text{y} \quad q = \rho c_p \frac{T(z_1) - T(z_2)}{\int_{z_1}^{z_2} dz/\alpha} \quad (1)$$

donde z_1 y z_2 son dos distancias según la dirección normal a una superficie de agua que evapora a una velocidad n , cuando recibe una cantidad q de calor. Normalmente se toma $z_1 = 0$ en la superficie libre de agua y z_2 se encuentra a pocos centímetros por encima de ella.

Como las ecuaciones (1) son análogas a la ley de Ohm: $i = \frac{\Delta V}{R}$, pueden escribirse de la siguiente forma:

$$n = \frac{\Delta \rho_v}{r_v} \quad \text{y} \quad q = \frac{\rho c_p \Delta T}{r_q}, \quad (2)$$

donde las *resistencias a la difusión* para la transferencia del vapor de agua y flujo convectivo del calor se identifican mediante la notación r_v y r_q , respectivamente.

Presión de vapor saturado. El estado de una masa definida de agua pura, encerrada en un volumen igualmente determinado y lo suficientemente extenso como para contener las fases líquida y de vapor, sometida a una presión y temperatura variables, pero de equilibrio termodinámico, mayores que la del punto triple, se podrá representar en un diagrama *presión-temperatura* determinando lo que se denomina una *curva de vaporización* o de *presión de vapor (de agua pura) saturado*, dado por una relación $P_{as} = f(T)$.

Si esta masa de agua en cambio se somete a la presión atmosférica en un recipiente abierto, emitirá vapores que se mezclarán con el aire circundante y no podrá por lo tanto alcanzar la presión de vapor saturado. Sin embargo, el estado de equilibrio líquido-vapor para el caso del agua pura representa un punto de referencia de la presión del vapor de agua en aire. Además, la presión de vapor del agua en aire húmedo saturado, P_s , difiere muy poco de la presión de vapor de saturación del agua pura, al menos para las condiciones habituales de secado. Por lo tanto puede usarse P_{as} en lugar de P_s , aun cuando P_s es función de la presión total y de la temperatura y P_{as} lo es solo de la temperatura.

Déficit de presión de vapor de saturación. El *déficit de presión de vapor de saturación* del aire (a veces llamado "déficit de presión de vapor") es la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real, es decir: $P_s(T) - P_v$.

Esta puede ser considerada como una medida del "poder de secado" del aire y por lo tanto tiene importancia en la determinación de las velocidades relativas de evaporación del agua en contacto con aire o de productos vegetales puestos a secar. Es una medida de la falta de equilibrio entre una superficie húmeda y el aire que sopla sobre ella.

Humedad específica y densidad de vapor: Suponiendo que una masa m de aire húmedo está compuesta por aire seco en una cantidad m_a y vapor de agua dado por m_{ag} , vale la relación $m = m_a + m_{ag}$.

La *humedad específica* es la relación entre la masa de vapor de agua, m_{ag} , contenida en aire húmedo y la masa total de éste, m , y se indica mediante la letra w : $w = m_{ag}/m$. Esta es una cantidad cuyo uso es apropiado para el tratamiento de problemas de transporte de vapor en la baja atmósfera debido a que es independiente de la temperatura.

Otra que está íntimamente relacionada es la *densidad del vapor* y se define como la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen V de aire húmedo: $\rho_v = m_{ag}/V$.

Como la *densidad del aire húmedo* está dada por $\rho = m/V$, resulta que $\rho_v = \rho w$.

Expresión aproximada de la densidad del vapor. De acuerdo con la ley de Dalton para una mezcla de gases, la presión total P de aire húmedo es igual a la suma de las presiones parciales P_v y P_a del vapor y del aire seco respectivamente. Por otro lado, vale la ecuación de los gases ideales para el vapor, de modo que la presión parcial del vapor del aire se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_v = \frac{m_{ag} RT}{M_{ag} V},$$

donde $M_{ag} = 18 \frac{g}{mol}$ y T es la temperatura del aire. Relacionando con la definición de ρ_v :

$$\rho_v = \frac{P_v M_{ag}}{RT}.$$

También se tiene para la componente de aire seco que

$$P_a = \frac{m_a RT}{M_a V} \implies \rho_a = \frac{(P - P_v) M_a}{RT},$$

donde ρ_a es la densidad del aire seco, con $M_a = 29 \text{ g/mol}$. Como al igual que ρ_v , esta densidad está referida al volumen de aire total, la suma de ellas es la masa total de aire dividida por el volumen, o sea la densidad del aire húmedo:

$$\rho = \rho_v + \rho_a = \frac{M_{ag} P_v + M_a (P - P_v)}{RT}.$$

Por lo tanto la humedad específica está dada por:

$$w = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{M_{ag} P_v}{M_{ag} P_v + M_a (P - P_v)} = \frac{0,622 P_v}{0,622 P_v + (P - P_v)} \approx \frac{0,622 P_v}{P},$$

o, lo que es lo mismo:

$$\rho_v \approx \frac{0,622 \rho P_v}{P}$$

donde al aproximar se tiene en cuenta que P_v es dos órdenes de magnitud menor que P .

BALANCE ESTACIONARIO DE ENERGIA SOBRE UNA MASA DE AGUA

La Primera Ley de la Termodinámica establece que cuando se realiza un balance de los flujos de calor sobre un sistema físico, la entrada y la salida deben ser exactamente iguales.

Al realizar el balance de energía sobre una masa de agua pura en estado estacionario, puede expresarse de manera general mediante una ecuación de la forma:

$$I + q = \lambda n. \quad (3)$$

Si sobre la superficie de agua se desplaza una corriente de aire, cuya temperatura y presión de vapor son T y P_v y los correspondientes valores en la interfase agua-aire son T_{ag} y $P_s(T_{ag})$, las resistencias a las transferencias de calor y vapor entre la superficie y el punto donde se miden T y P_v serán r_q y r_v , respectivamente. Por lo tanto, la ecuación (3) se compone de los siguientes términos:

I , radiación neta que recibe la superficie,

$q = \rho c_p(T - T_{ag})/r_q$, donde ρc_p es el calor específico volumétrico del aire,

$\lambda n = \lambda(\rho_{vs} - \rho_v)/r_v \approx (0,622\lambda\rho/P)[P_s(T_{ag}) - P_v]/r_v$.

Por lo tanto:

$$I + \frac{\rho c_p(T - T_{ag})}{r_q} = \frac{(0,622\lambda\rho)}{r_v} \frac{[P_s(T_{ag}) - P_v]}{P}. \quad (4)$$

Introduciendo en ésta la expresión:

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

que es la linealización de $P_s(T_{ag})$ alrededor de T , será posible eliminar T_{ag} y evaluar n como función de la temperatura y la presión de vapor de la corriente de aire y de las dos resistencias.

Despejando $T - T_{ag}$ y llevando a la expresión $\lambda n = \rho c_p(T - T_{ag})/r_q + I$, resulta:

$$n = \frac{\rho c_p [P_s(T) - P_v] / (r_q \lambda)}{\Delta + \gamma^*} + \frac{\Delta / \lambda}{\Delta + \gamma^*} I \quad (5)$$

donde $\Delta = dP_s/dT \Big|_T$ y $\gamma^* = \gamma r_v/r_q$ es la *constante del psicrómetro* modificada por el coeficiente r_v/r_q . La ecuación (5) fue deducida originalmente por H. L. Penman en 1948 y se emplea para estimar el potencial de evapotranspiración de las plantas.

EXPERIENCIAS DE EVAPORACION CON RADIACION

Se realizaron experiencias de laboratorio de evaporación por acción de una corriente de aire sobre una superficie de agua que se expone a la misma, cuando además se considera la acción de la radiación. Los parámetros de estas experiencias fueron:

- Radiación: entre 0 W/m^2 y 880 W/m^2 .
- Superficie libre del agua: $21 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} = 315 \text{ cm}^2$.
- Velocidad del aire: $0,2 \text{ m/s}$.
- Temperatura del aire: alrededor de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Temperatura de bulbo húmedo: entre 24 y $28 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Presión atmosférica promedio en Salta: $P = 880 \text{ HPa}$.

De la medición del peso de la muestra de agua en función del tiempo se pudo calcular n para cada experiencia y, al graficar para cada valor de la radiación incidente, se obtuvo la Figura 1 que muestra una dependencia lineal entre ambas variables, tal como lo establece la ecuación de Penman. Para usar una combinación adecuada de unidades de modo que

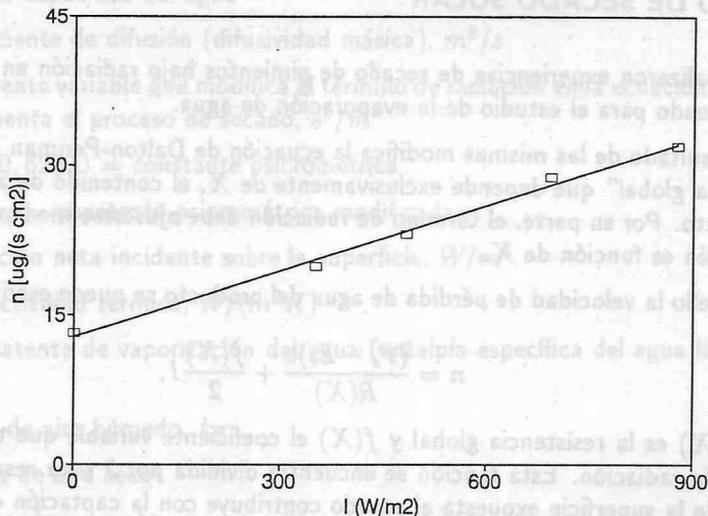


Figure 1: Influencia de la radiación en la evaporación de agua.

los valores numéricos no tengan que escribirse acarreado potencias de diez, n se expresó en $\mu\text{g}/(\text{s cm}^2)$.

Tanto la Figura 1 como la ecuación (5) permiten expresar n en forma simplificada mediante la siguiente relación:

$$n = k_1(P_s - P_v) + k_2I, \quad (6)$$

donde k_1 y k_2 son constantes para las condiciones establecidas. Los valores numéricos de las mismas, obtenidos con un 6 % de error, fueron los siguientes:

$$k_1 = 2,13 \cdot 10^{-8} \frac{\text{s}}{\text{m}} \quad \text{y} \quad k_2 = 2,43 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)^2.$$

Su comprobación con datos de la bibliografía valida el equipo de laboratorio para su uso en el estudio experimental del secado.

Influencia de la velocidad del aire

La velocidad de evaporación en la ecuación de Penman depende linealmente de la radiación incidente y del déficit de saturación dado por $P_s - P_v$. La influencia del viento se encuentra en la resistencia r_q que a mayor velocidad del aire disminuye su valor en forma inversamente proporcional.

El modelo de Dalton [7] propone en (6) una dependencia lineal de k_1 con la velocidad del aire, $k_1 = kv$, por lo que la siguiente ecuación de "Dalton-Penman" se puede aplicar al fenómeno de evaporación de agua bajo radiación:

$$n = k(P_s - P_v)v + k'I. \quad (7)$$

MODELO DE SECADO SOLAR

Se realizaron experiencias de secado de pimientos bajo radiación en el mismo laboratorio empleado para el estudio de la evaporación de agua.

El resultado de las mismas modifica la ecuación de Dalton-Penman introduciendo una "resistencia global" que depende exclusivamente de X , el contenido de agua en base seca del producto. Por su parte, el término de radiación debe ajustarse mediante un coeficiente que también es función de X .

Con ello la velocidad de pérdida de agua del producto se puede escribir de la siguiente forma:

$$n = \frac{(P_s - P_v)v}{R(X)} + \frac{f(X)}{2}I, \quad (8)$$

donde $R(X)$ es la resistencia global y $f(X)$ el coeficiente variable que tiene en cuenta el efecto de la radiación. Esta función se encuentra dividida por 2 para resaltar el hecho que la mitad de la superficie expuesta al secado contribuye con la captación de radiación.

Tanto la recíproca de R como f correlacionan linealmente con X , resultando:

$$\frac{1}{R(X)} = (-1,08 + 1,07X)10^{-9}\left(\frac{s}{m}\right)^2, \quad f(X) = (-6,1 + 27,1X)10^{-9}\left(\frac{s}{m}\right)^2$$

para pimiento rojo de tipo morrón con $1,2 \leq X \leq 13$.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el proceso de evaporación del agua se puede lograr una mejor comprensión del fenómeno de secado.

Se obtuvo un modelo de secado con radiación que, si bien se aplicó al caso de pimientos, puede también ser de utilidad para otros productos vegetales.

Modelos de esta naturaleza, que incluyen de manera explícita la acción de la radiación sobre el producto, son de aplicación en el estudio y simulación del funcionamiento de secadores solares de tipo invernadero.

Si bien los resultados de las correlaciones para $R(X)$ y $f(X)$ fueron obtenidos en laboratorio bajo condiciones constantes de radiación, velocidad del aire y temperaturas, es de esperar que brinden información cuantitativa para la escala real en la cual dichas condiciones varían con el tiempo.

Como trabajo futuro puede encararse la realización de experiencias de secado en dicha escala para validar los resultados del laboratorio.

NOMENCLATURA

A = área superficial, m^2

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

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

c_{pag} = calor específico del agua

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

f = coeficiente variable que modifica el término de radiación en la ecuación de Penman para tener en cuenta el proceso de secado, s^2/m^2

$\gamma = Pc_p/(0,622\lambda) =$ constante psicrométrica

$\gamma^* = \gamma r_v/r_q =$ constante psicrométrica modificada

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

k = conductividad térmica, $W/(m^2K)$

λ = calor latente de vaporización del agua (entalpía específica del agua líquida saturada), J/kg

m = masa de aire húmedo, kg

m_a = masa de aire seco

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_a = presión parcial del aire seco, Pa

P_{as} = presión de vapor de agua pura en el estado de saturación, Pa

P_s = presión de vapor del agua en aire húmedo en el estado de saturación. Se diferencia de la presión de saturación del agua pura debido a la presencia del aire

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

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

R = resistencia global que modifica la ecuación de Penman de la evaporación para tener en cuenta el proceso de secado, m^2/s^2

r_v = resistencia a la difusión para la transferencia de vapor de agua, s/m

r_q = resistencia a la difusión para la transferencia de calor, s/m

$\rho = m/V =$ densidad del aire húmedo, kg/m^3

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

t = tiempo, s

T = temperatura de bulbo seco del aire, K

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

T_{bh} = temperatura de bulbo húmedo

v = velocidad del aire, m/s

V = volumen de aire húmedo, m^3

$w = m_{ag}/m =$ humedad específica del aire en base húmeda