

ESTUDIO DEL SECADO DE CAPSICUM ANNUUM L A TRAVÉS DEL MODELO DE LUIKOV

José Hernández R.¹, Pedro Quinto D.²,

Jaime Cuevas¹, Roberto Acosta¹; Jorge O. Aguilar A.¹

¹Universidad de Quintana Roo, México
Blvd. Bahía s/n Esq. Ignacio Comonfort, Col Del Bosque, Chetumal Quintana Roo
Tel. 983-503-24. Email: josherna@uqroo.mx

²LABINTHAP, SEPI-ESIME-IPN.
Edif. 5 3er piso Unidad Profesional Adolfo López Mateos Zacatenco, México, DF.
pqd510@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se estudia el proceso de secado del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L), tanto desde el punto de vista teórico como experimental, para esto se realizaron pruebas de secado de chile jalapeño entero a tres diferentes temperaturas 55, 65 y 70 °C en un túnel de secado, los resultados experimentales obtenidos se han comparado con respecto a los valores teóricos que proporciona la solución numérica del modelo matemático de la teoría de Luikov, el cual se ha resuelto por el método de diferencias finitas. Con la solución numérica se ha modelado el comportamiento del perfil de contenido de humedad en el chile jalapeño, encontrándose que son los números de Lu, Bim y Pn los que tienen mayor influencia en la pérdida de humedad.

INTRODUCCIÓN.

El chile es un producto agrícola de gran importancia para México, dado que ocupa el segundo lugar mundial como productor de esta hortaliza, con una producción de 1.8 millones de toneladas anuales (25% de la cual se exporta), que equivalen a cerca de 150 mil hectáreas sembradas, con un valor estimado en más de siete mil millones de pesos [INEGI].

El secado es un proceso esencial en la preservación de los productos de origen agrícola, el cual ha venido siendo utilizado por el hombre desde hace muchos años. El primer método de secado desarrollado por el hombre consistió en la exposición directa del producto al sol. Esta técnica todavía es utilizada en el medio rural de los países en desarrollo, con la desventaja de que se obtiene una gran cantidad de producto de mala calidad ocasionado por las lluvias, el polvo, así como del ataque de insectos. Otras técnicas de secado de uso muy extendido es a través de secadores que emplean como combustible la leña, que si bien generan un producto de mejor calidad y en menor tiempo tienen la desventaja de los daños que causan al ambiente vía deforestación y contaminación

del aire. Finalmente el secado industrial ofrece calidad de secado pero sus altos costos limitan su uso.

Dentro de los estudios publicados sobre el secado de Chile, se tienen los siguientes: Tshewang [2], estudio la factibilidad técnica y económica del uso de la energía solar para el secado de productos agrícolas, tomando como caso de estudio el chile. Gauhar [3], llevo a cabo la evaluación de un secado solar tipo túnel para el secado de chile, comparando sus resultados con respecto a otros tipos de secadores. Hossain [4], analizó las curvas características de secado del chile bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad y velocidad del medio secante y las comparó con respecto a los valores que predicen ecuaciones semiempíricas. Gupta [5], estudió la influencia de diversos pretratamientos del chile en la velocidad de secado.

Cabe señalar que en los estudios publicados sobre el secado de este producto, se han empleado principalmente modelos semiempíricos.

En el análisis del proceso de secado se involucran dos fenómenos simultáneos acoplados, que son la transferencia de calor y la transferencia de masa, por

lo que dicho análisis resulta influenciado por un gran número de factores, que se pueden separar en dos grupos: el primero se relaciona con el medio secante, que incluye temperatura, humedad relativa y velocidad de dicho medio, y el segundo, se asocia a las propiedades termofísicas del cuerpo a secar, en donde se agrupan, densidad, temperatura, y permeabilidad, entre otras. Esta situación hace que el estudio del proceso de secado sea una materia de alta dificultad.

En la literatura, existen varios modelos que se han desarrollado para tratar de predecir el comportamiento de la distribución de temperatura y humedad en un material sometido al proceso de secado. Así entre estos destaca el modelo propuesto por Luikov [6], quien con base en la termodinámica de los procesos irreversibles estableció un modelo que hasta la fecha se considera como el más completo, por tomar en consideración los principales mecanismos de transferencia de humedad, como son: flujo capilar, difusión de líquido y vapor, así como la difusión térmica.

Dado que la solución analítica del modelo de Luikov es compleja, se ha optado por aplicar los métodos numéricos para su resolución. Con esto se puede contar con una herramienta que permita predecir el proceso de secado de un producto, y también estudiar y entender la influencia de cada una de las variables involucradas durante el mismo.

De entre las soluciones numéricas del modelo de Luikov, destacan la de Liu [7], quien estudió el secado de madera de abeto en condiciones de régimen permanente y transitorio; la de Scheerlinck [8] quien aplicó el método de Monte Carlo para estudiar las variaciones de los perfiles de temperatura y humedad en granos de soya bajo la influencia de parámetros aleatorios; y la de Mikhailov [9] quien estudió el desplazamiento del frente de evaporación en un cuerpo sometido a un proceso de secado.

Cabe hacer mención que a pesar de disponer de diferentes soluciones numéricas, estas solo se han aplicado a unos pocos casos específicos. Esto se debe en gran medida a la falta de datos sobre los diferentes parámetros que intervienen en el modelo de Luikov.

Así, debido al interés por el estudio de los procesos de secado, en este trabajo se analiza el proceso del secado de chile jalapeño, tanto desde el punto de vista teórico como experimental. Para lo cual, se llevaron a cabo pruebas de secado de chile jalapeño en un túnel de secado y los resultados experimentales obtenidos se comparan con respecto a los que se obtienen a

través de la solución de las ecuaciones de la teoría de Luikov.

MODELO DE LUIKOV.

El proceso de secado en su análisis mas simple puede considerarse como un problema unidimensional de transferencia simultánea de calor y masa, como se ilustra en la figura 1. Los flujos de calor y humedad se presentan en la dirección x. Para este caso, las ecuaciones que conforman el modelo de Luikov son las siguientes:

Ecuación de transferencia de calor

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a' \nabla^2 T + \frac{\varepsilon L C_m}{c'} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

$$a' = \frac{C_q a_q}{c'}$$

$$\varepsilon = \frac{d_i u}{du}$$

$$c' = C_q + \varepsilon L C_m U'_T$$

$$C_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \theta_i} \right)_T$$

$$dU = \frac{1}{C_m} du + U'_T dT$$

$$U'_T = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_u$$

La ecuación (1) indica que la variación de la temperatura dentro de un volumen de control diferencial es ocasionada por el flujo de calor que atraviesa las superficies del volumen de control por medio de conducción en el medio poroso húmedo y por la variación de la energía debido a la evaporación de la humedad contenida en dicho volumen de control.

Ecuación de transferencia de masa

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D' \nabla^2 U + D' \delta \nabla^2 T \quad (2)$$

Donde:

$$\delta = C_m \left(\frac{\Delta \theta_2}{\Delta T} \right)$$

La ecuación (2) expresa que el potencial de humedad dentro de un volumen de control diferencial varía con respecto al tiempo, debido a la suma de la migración de humedad a través de las superficies del sólido húmedo producida por la difusión y por el coeficiente de gradiente térmico.

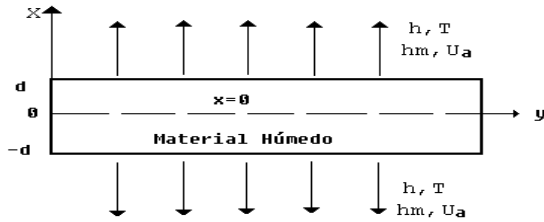


Figura 1. Modelo unidimensional del proceso de secado.

En la superficie del cuerpo a secar ($x = \pm d$), se aplican las siguientes condiciones de frontera de tercer tipo:

$$k_q \frac{\partial T}{\partial x} + h(T - T_a) + (1 - \varepsilon)Lh_m(U - U_a) = 0 \quad (3)$$

$$k_m \frac{dU}{dx} + k_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} + h_m(U - U_a) = 0 \quad (4)$$

k_q y k_m son los coeficientes de transferencia de calor y de masa respectivamente; T_a y U_a son la temperatura y el potencial de humedad del medio secante.

En el centro del material a secar ($x = 0$), se cumple con:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Las condiciones iniciales del material se asumen constantes y se representan como:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (7)$$

$$U(x, 0) = U_0 \quad (8)$$

SOLUCIÓN DEL MODELO DE LUIKOV:

Para facilitar el análisis y la solución de las ecuaciones de transferencia de calor y de masa de Luikov, se sigue el procedimiento propuesto por Liu [7], en donde se parte de adimensionalizarlas, para reducir así el número de parámetros que intervienen en el modelo matemático.

Las variables adimensionales que se eligen son:

$$X = \frac{x}{d} \quad \text{Coordenada adimensional} \quad (9)$$

$$Fo = \frac{a't}{d^2} \quad \text{Fourier} \quad (10)$$

$$Bi_q = \frac{hd}{k} \quad \text{Biot de transferencia de calor} \quad (11)$$

$$Bi_m = \frac{h_m d}{k_m} \quad \text{Biot de transferencia de masa} \quad (12)$$

$$K_o = \frac{LC_m(U_0 - U_a)}{c'(T_a - T_0)} \quad \text{Kossovitch} \quad (13)$$

$$L_u = \frac{D'}{a'} \quad \text{Luikov} \quad (14)$$

$$P_n = \frac{\delta'(T_a - T_0)}{(U_0 - U_a)} \quad \text{Posnov} \quad (15)$$

$$\Theta_1 = \frac{T - T_0}{T_a - T_0} \quad \text{Temperatura adimensional} \quad (16)$$

$$\Theta_2 = \frac{U_0 - U}{U_0 - U_a} \quad \text{Potencial de humedad adimensional} \quad (17)$$

Haciendo uso de los números adimensionales señalados en las ecuaciones (9) a (17), el modelo de Luikov se transforma en:

a) Ecuación de transferencia de calor:

$$\frac{\partial \Theta_1(X, F_0)}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \Theta_1(X, F_0)}{\partial X^2} - \varepsilon K_o \frac{\partial \Theta_2(X, F_0)}{\partial F_0} \quad \text{en } X \in \Omega \text{ para } F_0 \geq 0 \quad (18)$$

b) Ecuación de transferencia de masa:

$$\frac{\partial \Theta_2(X, F_0)}{\partial F_0} = Lu \frac{\partial^2 \Theta_2(X, F_0)}{\partial X^2} - Lu P_n \frac{\partial \Theta_1(X, F_0)}{\partial X^2} \quad \text{en } X \in \Omega \text{ para } F_0 \geq 0 \quad (19)$$

Asimismo, las condiciones de frontera e iniciales se transforman en:

- Condiciones de frontera

Considerando que tanto la superficie inferior como la superior del cuerpo a secar están sujetas a las mismas condiciones, las condiciones de frontera quedan como:

En la superficie del cuerpo, $X=0$ ó $X=1$

$$\frac{\partial \Theta_1(0, F_0)}{\partial X} = Bi_i [1 - \Theta_1(0, F_0)] - (1 - \varepsilon) Ko Lu B_m [1 - \Theta_2(0, F_0)]$$

para $F_0 > 0$ (20)

$$Pn \frac{\partial \Theta_1(0, F_0)}{\partial X} - \frac{\partial \Theta_2(0, F_0)}{\partial X} + Bi_m [1 - \Theta_2(0, F_0)] = 0$$

para $F_0 > 0$ (21)

- En la parte central del material, $X=0.5$

$$\frac{\partial \Theta_1(0.5, F_0)}{\partial X} = 0$$

para $F_0 > 0$ (22)

$$\frac{\partial \Theta_2(0.5, F_0)}{\partial X} = 0$$

para $F_0 > 0$ (23)

- Condiciones iniciales:

$$\Theta_1(X, F_0) = \frac{T(x, t) - T_0}{T_* - T_0}$$

para $0 \leq X \leq 1; F_0 \geq 0$ (24)

$$\Theta_2(X, F_0) = \frac{U_0 - U(x, t)}{U_0 - U_*}$$

para $0 \leq X \leq 1; F_0 \geq 0$ (25)

La solución del sistema de ecuaciones de Luikov, se realizó mediante el método de diferencias finitas. Debido a que este modelo está formado por dos ecuaciones diferenciales parciales acopladas, la solución con el método de diferencias finitas produce un sistema de ecuaciones algebraicas de $2n$ ecuaciones con $2n$ incógnitas, teniendo así para cada nodo en la dirección X un par de ecuaciones algebraicas.

La partición del dominio consta de $n-1$ por $m-1$ rectángulos, de lados ΔX en la dirección X (coordenada espacial) y ΔF_0 en la coordenada temporal. Para la sustitución de las derivadas

parciales que existen en el modelo de Luikov, se empleó un método implícito con el esquema de diferencias hacia atrás.

El sistema de ecuaciones en diferencias finitas, se resuelve por el método de inversión de matriz, obteniéndose los valores nodales para la temperatura y para el potencial de humedad; ambos en forma adimensional.

SECADO DE CHILE JALAPEÑO

Para llevar a cabo los experimentos de secado, se obtuvieron en el mercado local 8 kg de chile jalapeño, el cual fue lavado y almacenado en bolsas plásticas para después conservarse en refrigeración hasta el momento de su uso. Para cada experimento se emplearon 6 muestras del producto, y dos más se emplearon para obtener el peso seco, de acuerdo con el procedimiento que a continuación se describe.

Para obtener la masa seca del chile jalapeño se utilizó un horno eléctrico, en donde el producto se seco a una temperatura de 95 °C, verificando las variaciones de peso cada 20 minutos, hasta que pasadas 3 horas no se detecto variación alguna del mismo. Para la medición del peso de las muestras se utilizó una balanza con un margen de error de ± 0.001 g.

Una vez obtenido el peso seco del chile jalapeño, el contenido de humedad en base húmeda se calculo por medio de la siguiente expresión:

$$X = \frac{W - W_s}{W} \quad (26)$$

donde:

W, W_s : peso total del producto y peso seco del producto respectivamente.

Para las pruebas de secado, se empleó un túnel de secado que se describe en la Figura 2. El equipo cuenta con controladores de temperatura y velocidad del aire. Para todas las pruebas se utilizó la misma velocidad del medio secante de 1 m/s.

Las pruebas de secado, se realizaron procurando mantener una variación en la temperatura del medio secante de ± 1 °C durante la misma. Las

muestras se fueron pesando en intervalos de 1 hr para verificar la pérdida de humedad. El peso inicial promedio de las muestras fue de 32.15 g, y el peso seco promedio empleado como referencia, obtenido del secado en el horno corresponde a un valor de 3.6 g.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En la Figura 3, se muestra la comparación de las curvas de secado experimentales obtenidas con las temperaturas de 55, 65 y 70 °C. Los resultados indican una mayor velocidad de secado en las muestras de chile sometidas a la temperatura de 70 °C, y una menor velocidad de secado en las muestras sometidas a la temperatura de 55 °C, lo cual es razonable de

acuerdo con la experiencia y con los resultados publicados por otros investigadores.

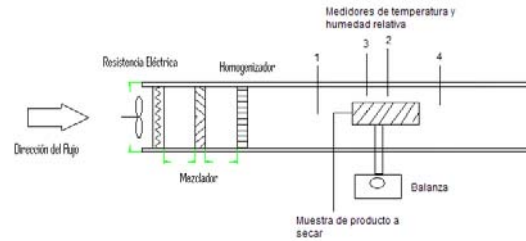


Figura 2. Diagrama del arreglo experimental

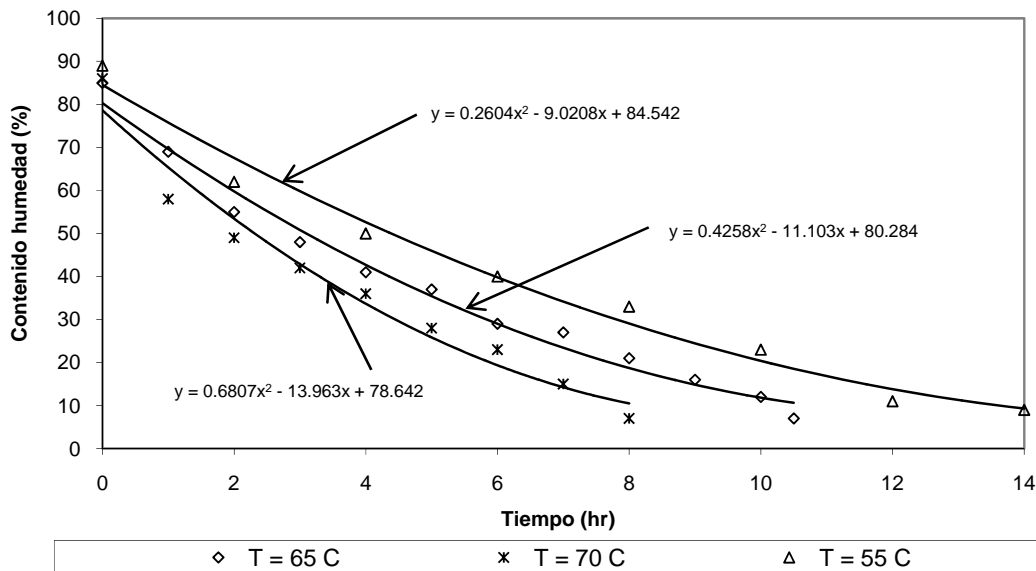


Figura 3. Comparación de curvas de secado del chile jalapeño para diferentes temperaturas

Se ha logrado obtener chile jalapeño con un contenido de humedad en promedio de 6 a 8 % en 14 horas con una temperatura de secado de 55 °C, en tanto que cuando la temperatura utilizada fue de 65 °C el tiempo de secado reduce a 10 hrs, y con la temperatura de 70 °C el tiempo de secado fue de 8 horas.

Usando algunos datos recabados en la literatura especializada respecto a las propiedades del chile jalapeño [10,11], así como de datos generados experimentalmente, se obtuvieron los diferentes parámetros que emplea el modelo de Luikov, y que son los que se muestran en la Tabla 1.

Para obtener las curvas teóricas de secado con el modelo de Luikov, se hizo la consideración de que el chile jalapeño es un cuerpo regular, con el objeto de simplificar el modelo matemático.

En la Figura 4, se presentan las curvas que se obtienen con el uso del modelo de Luikov para el secado de chile jalapeño a las tres temperaturas usadas en los experimentos.

Tabla 1. Valores de los parámetros principales utilizados en la solución numérica del modelo de Luikov.

Parámetro	Símbolo	Valor
Número Luikov	Lu	2.0348
Número Kossovitch	Ko	53.694
Número Posnov	Pn	0.1853
Biot de Transferencia de Calor	Bi_q	0.9813
Biot de Transferencia de Masa	Bi_m	0.0247
Número de Fourier	Fo	62.813

Se han comparado los resultados experimentales con los numéricos proporcionados por el modelo de Luikov, en donde por ejemplo en la Figura 5 se ilustra el caso del secado a 55°C. En dicha gráfica, se aprecia ambas curvas tienden a un mismo valor final del contenido de humedad, aunque se pueden observar discrepancias entre los valores medidos y los que predice el modelo de Luikov durante el proceso.

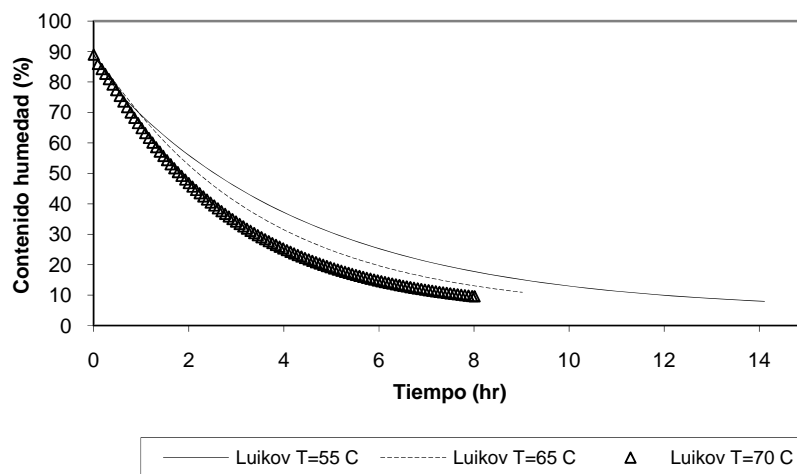


Figura 4. Curvas proporcionadas por la solución numérica del modelo de Luikov para el secado de Chile Jalapeño

Se han comparado los resultados experimentales con los numéricos proporcionados por el modelo de Luikov, en donde por ejemplo en la Figura 5 se ilustra el caso del secado a 55°C. En dicha gráfica, se aprecia ambas curvas tienden a un mismo valor final del contenido de humedad, aunque se pueden observar discrepancias entre los valores medidos y los que predice el modelo de Luikov durante el proceso.

INFLUENCIA DE LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD.

Finalmente, con el programa desarrollado para la solución numérica del modelo de Luikov, se analizó la influencia que tienen los diferentes números adimensionales en la pérdida de humedad del chile jalapeño.

En la Figura 6, se observa la curva del perfil de contenido de humedad en función del número de Fourier adimensional con respecto a diferentes valores del número de Posnov (Pn).

En esta gráfica se puede observar que a valores más pequeños de Pn , se incrementa la pérdida de humedad. Esto se debe a que el número de Pn , establece una relación entre la velocidad de transferencia de humedad por termodifusión, con respecto a la difusión. Así, valores pequeños Pn , implican que la difusión de humedad es el mecanismo que predomina durante el secado.

En la Figura 7, la misma curva del perfil de contenido de humedad se presenta en función del número de Lu , observándose que entre mayor es el número de Lu , la pérdida de humedad en el material es más rápida.

Esto se explica por el hecho de que el número de Lu está relacionado con la velocidad de difusión de humedad con respecto a la transferencia de calor en el material. Es decir, que la pérdida de humedad durante el secado, no necesariamente se favorece con la aplicación de mayores temperaturas.

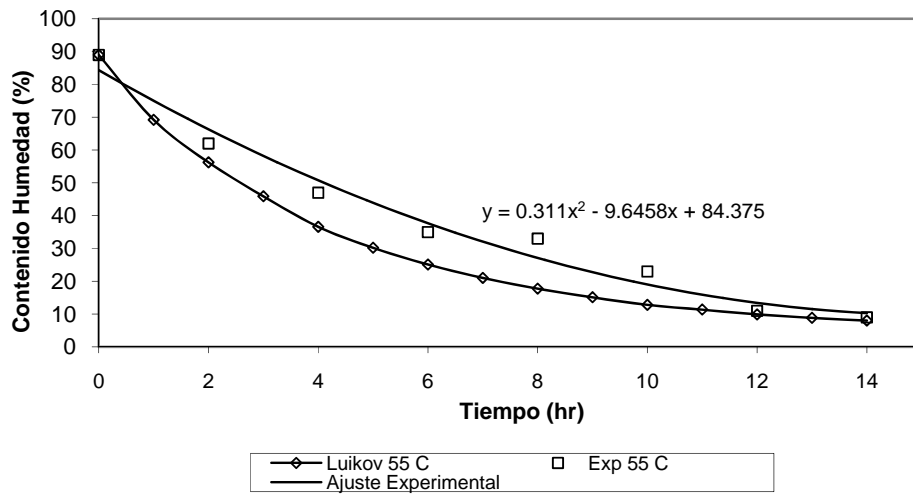


Figura 5. Comparación de resultados teóricos y experimentales del proceso de secado de chile jalapeño.

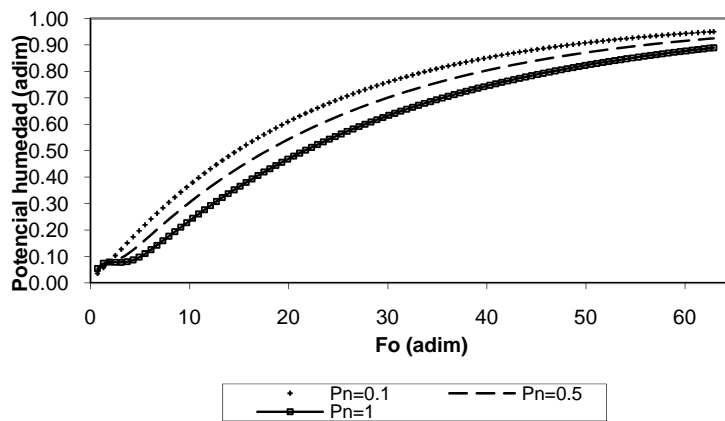


Figura 6. Perfil de contenido de humedad del chile jalapeño en función de los números adimensionales de Fo y Pn.

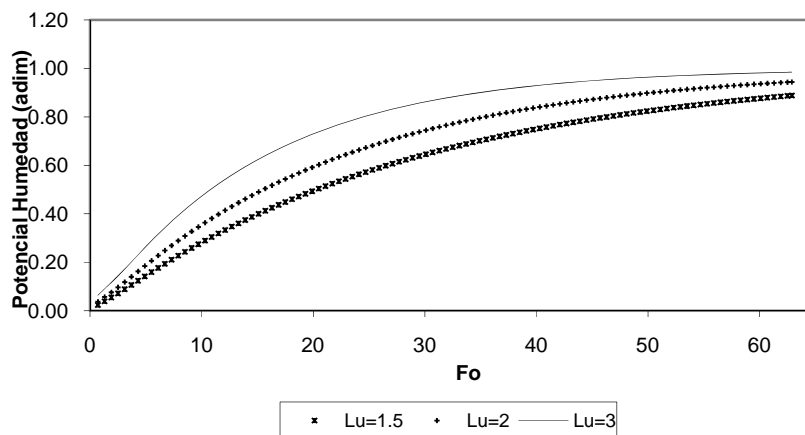


Figura 7. Perfil de contenido de humedad del chile jalapeño en función de los números adimensionales de Fo y Lu

Lo anterior se debe a que a mayores temperaturas, la humedad superficial se evapora más rápidamente, pero a la vez genera mayores esfuerzos en la superficie del material, provocando que se colapsen los poros, dejando la humedad atrapada hacia el interior del material y sin posibilidades de seguir moviéndose hacia la superficie donde pueda evaporarse.

En la Figura 8 se observa que el número de Biot de transferencia de masa (Bi_m) tiene un efecto muy significativo en la pérdida de humedad. Con valores pequeños de Bi_m , en el rango de 0.01 a 0.1 se obtienen los mejores resultados en la disminución de humedad del producto. Pero

cabe señalar que esto tiene un límite, ya que para valores de Bi_m mayores de 0.1 la pérdida de humedad ya no crece de forma tan significativa.

El número de Bi_m , representa la relación de la resistencia interna a la transferencia de humedad y la resistencia externa. Valores menores de 0.1 de Bi_m , implica que prácticamente no existe una resistencia interna al transporte de humedad, lo que significa que un material rápidamente perdería toda su humedad.

Finalmente, se puede observar en las Figuras 9 y 10 que el número de Biot de transferencia de calor y el número de Ko , no tienen influencia en el incremento de la pérdida de humedad en el chile jalapeño.

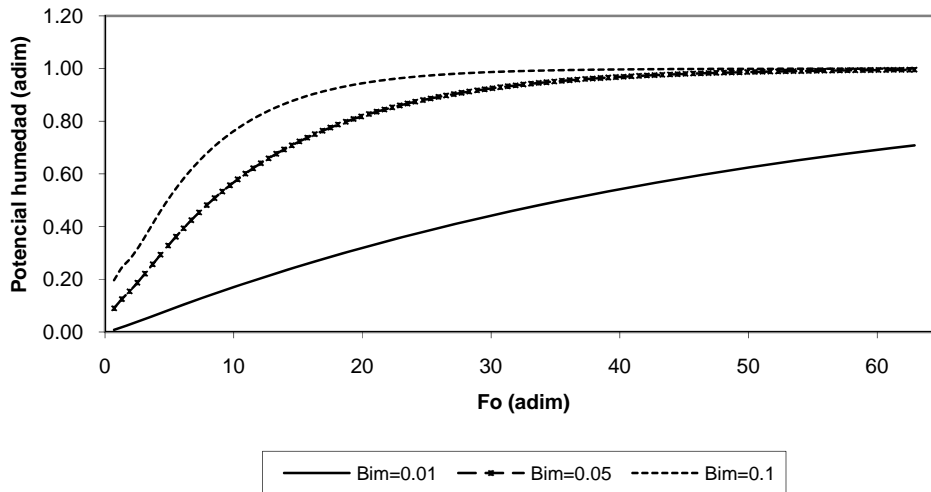


Figura 8. Perfil de contenido de humedad del chile jalapeño en función de los números adimensionales de Fo y Bi_m .

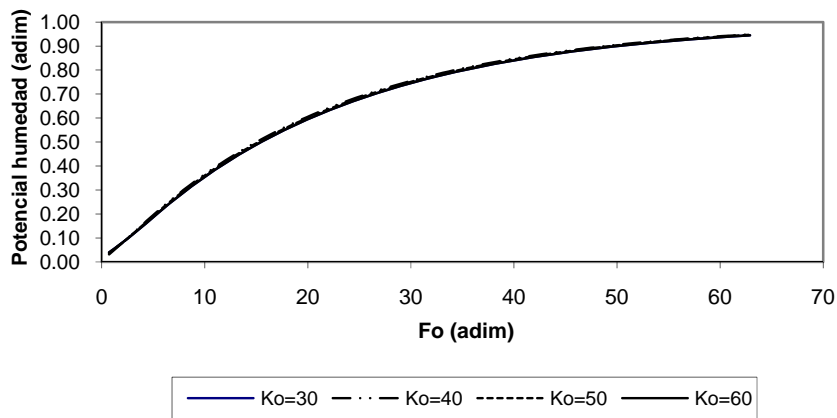


Figura 9. Perfil de contenido de humedad del chile jalapeño en función de los números adimensionales de Fo y Ko .

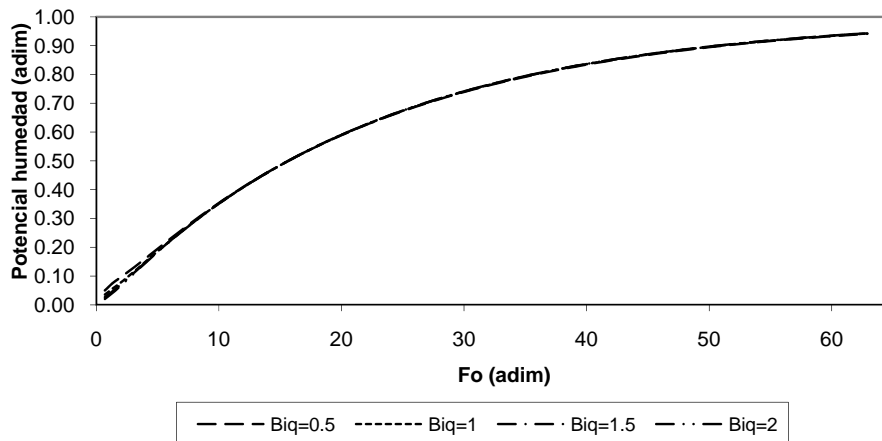


Figura 10. Perfil de contenido de humedad del chile jalapeño en función de los números adimensionales de Fo y Biq

CONCLUSIONES.

En el secado de chile jalapeño, se ha encontrado que la temperatura tiene un papel importante en la reducción del tiempo de secado, ya que a mayor temperatura el tiempo de secado se reduce considerablemente.

Más específicamente, con el uso de la solución numérica de Luikov, se ha encontrado que los números de Biot de transferencia de masa, Luikov y Posnov son los que influyen más en la pérdida de humedad del chile jalapeño.

Se ha encontrado que las mayores diferencias entre los valores teóricos y experimentales del contenido de humedad durante el secado de chile jalapeño, se presentan durante las primeras 4 a 6 horas de iniciado el proceso y que son del orden de un 28 %.

Sin embargo a pesar de dichas diferencias, se considera que la solución numérica del modelo de Luikov, constituye una herramienta importante en la comprensión de cómo se desarrolla el proceso de secado de un producto como el chile jalapeño, y que puede aportar información muy valiosa para analizar los parámetros que incluyen de forma mas significativa en el proceso.

SIMBOLOGÍA

D' Coeficiente de difusión en función del potencial de humedad [m²/s]

- D_v Coeficiente de difusión de vapor [m²/s]
- D_l Coeficiente de difusión de líquido [m²/s]
- Pn Número de Posnov [Adimensional]
- U Potencial de humedad [°M]
- M Grados de humedad
- Bi_q Número de Biot de transferencia de calor [Adimensional]
- Bi_m Número de Biot de transferencia de masa [Adimensional]
- h Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m² K]
- d Espesor del material [m]
- k_q Coeficiente de conductividad térmica [W/m K]
- k_m Coeficiente de transferencia de masa [kg/m s °M]
- h_m Coeficiente de convección de humedad [kg/s]
- t Tiempo [s]
- Lu Número de Luikov [Adimensional]
- Ko Número de Kossovitch [Adimensional]
- Fo Número de Fourier [Adimensional]
- X Coordenada [Adimensional]
- L Calor latente de evaporación [J/kg]
- T Temperatura [K ó °C]
- a' Coeficiente de difusividad térmica en función del potencial de humedad [m²/s]
- u Contenido de humedad en base seca [kg_{humedad}/kg_{seco}]
- c' Calor específico del cuerpo húmedo [J/kg K]
- C_m Capacidad isotérmica de humedad [kg_{humedad}/kg_{seco} °M]

θ_1	Temperatura [Adimensional]
θ_2	Potencial de humedad [Adimensional]
δ'	Coficiente relativo de termodifusión en función del potencial de humedad [$^{\circ}\text{M}/\text{K}$]
ε	Coficiente de Transformación de líquido a vapor [Adimensional]
C_q	Calor específico del cuerpo húmedo [j/kg K]
a_q	Coficiente de difusividad térmica [m^2/s]
U'_T	Coficiente de potencial de humedad isotérmico [$^{\circ}\text{M}/\text{K}$]
T_a	Temperatura del aire [K ó $^{\circ}\text{C}$]
U_a	Potencial de humedad del aire [Adimensional]
T_o	Temperatura del cuerpo húmedo [K ó $^{\circ}\text{C}$]
U_o	Potencial de humedad de cuerpo húmedo [Adimensional]
x	Distancia (m)

Scheerlinck N., Stochastic finite-element analysis of coupled heat and mass transfer problems with random field parameters. Numerical heat transfer. Part B, Vol. 37, pp 309-330 (2000).

Mikhailov M.D., General solutions of diffusion equations coupled at boundary conditions. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 16, pp 2155-2164 (1973).

Sadhna Arora; Shelly Bharti; V. K. Sehgal. Convective Drying of Red Chillies. Drying Technology, 24: 189-193, 2006.

M. Ayub Hossain; J. L. Woods; B. K. Bala. Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli. International Journal of Food Science and Technology 2007, 42, 1367-1375.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

INEGI. Anuario Estadístico de los estados Unidos Mexicanos. Edición 2005. pp 56-59.

Tshewang Lhendup. Technical and financial feasibility of a solar dryer in Buthan. Energy for sustainable development Vol. IX, No. 4. 2005.

Guar A. M., M. Augustus L., S. Kumar. Performance evaluation of a solar tunnel dryer for chilli drying. ASEAN Seminar & Workshop on drying technology. 3-5 June 1998. Phitsanulak Thailand.

M. A. Hossain, B.K. Bala. Thin-layer drying characteristic for green Chilli. Drying Technology. 20(2), 489-505, 2002.

Gupta P., J. Ahemd, U.S. Shivhare, G. S. V. Rayhavan. Drying characteristics of red chilli. Drying technology. 20(10), 1975-1987 (2002).

Luikov A. V. Systems of diferencial equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 18, pp 1-14 (1975).

Liu J. Y. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Int. J. Heat and Mass Transfer Vol. 34, No. 7, pp 1747-1754 (1991).