

MODELACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO DE CUBOS DE PAPA EN LECHO FLUIDIZADO

Anabel Frías¹, Gabriela Clemente², Luis Cruz¹, Fernando González¹ y Antonio Mulet²*

¹*Grupo de Ingeniería de Alimentos, Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Calle 114, Marianao, La Habana, Cuba.*

²*Grupo ASPA. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia, C/Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.*

E-mail: anabel@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue modelar las cinéticas de secado de cubos de papa en lecho fluidizado a partir de los modelos propuestos por Peleg y Weibull. Las cinéticas de secado fueron obtenidas por triplicado en un secador convectivo a escala de laboratorio a las temperaturas del aire de 30, 40, 50, 60 y 70 °C y velocidad del aire de 9 m/s. Ambos modelos describen de manera satisfactoria las cinéticas de secado; en todos los casos el porcentaje de varianza explicada (% var) fue superior al 99,5 % y el error medio relativo (EMR) inferior a 6,5 %. Los valores de energía de activación (Ea) estimados (23,11 kJ/mol y 22,31 kJ/mol para los modelos Peleg y Weibull, respectivamente) son del mismo orden que el reportado por otros autores para diferentes productos vegetales.

Palabras clave: secado, papa, modelación, cinética

ABSTRACT

Modeling of the fluidized bed drying kinetics of potato cubes

The aim of this work was to model fluidized bed drying kinetics of potato cubes using Peleg and Weibull models. Experimental drying kinetics were obtained by triplicate in a laboratory convective dryer to air drying temperatures of 30, 40, 50, 60 y 70 °C and air velocity of 9 m/s. Both models satisfactorily described the kinetics of drying considered; in all cases the percentage of explained variance (% var) was higher than 99.5 % and mean relative error (EMR) less than 6.5 %. The activation energy values (Ea) estimated (23.11 kJ/mol y 22.31 kJ/mol for Peleg and Weibull models, respectively) are of the same order as that reported by other authors for different vegetable products.

Keywords: drying, potato, modeling, kinetics

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es actualmente uno de los cultivos más importantes en la dieta a nivel mundial, ocupando el cuarto lugar después del arroz, el trigo y el maíz, debido a su elevado rendimiento y alto valor nutritivo (1). Por su versatilidad, la papa puede comercializarse de distintas maneras: para consumo en fresco, procesada (papa deshidratada, frita, congelada), como insumo (harina, almidón, sémola) o para semilla de la siguiente cosecha. En los países desarrollados, más del 50 % de la papa es consumido en forma de productos procesados (2).

En Cuba, la casi totalidad de la papa cosechada se conserva por refrigeración lo que implica altos niveles de deterioro de la materia prima y elevados consumos de energía.

***Anabel Frías Chirino:** Ingeniera Química (ISPJAE, 1997). Profesora Auxiliar. Doctora en Ciencias Técnicas (ISPJAE, 2011). Profesora Auxiliar del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química de la CUJAE. Desarrolla su quehacer investigativo en el campo de la deshidratación de productos vegetales.

Una alternativa puede ser la conservación por deshidratación.

Los alimentos secos son estables en condiciones ambientales, de fácil manipulación, poseen una mayor vida útil y pueden incorporarse fácilmente durante la formulación y preparación de las comidas.

Las papas deshidratadas son una importante fuente de carbohidratos para la elaboración de productos tales como sopas o ensaladas (3).

La elaboración de papa deshidratada debe garantizar un producto de elevada calidad además de la factibilidad económica del procesamiento de la misma. De ahí que en los últimos años se hayan investigado diferentes métodos de secado (secado por aire caliente, secado por infrarrojos, al vacío, microondas, etc.) para la papa por varios investigadores (1, 3-5).

El secado por aire caliente convencional es el método más comúnmente utilizado para la conservación de productos agrícolas en los países tropicales. Esta técnica requiere tiempos de secado muy largos y la calidad del producto no siempre es la más adecuada.

Una alternativa interesante es el secado en lecho fluidizado. Este requiere tiempos de secado mucho más cortos debido a la alta transferencia de calor y masa entre el aire y el material que está siendo secado garantizando a la vez un producto de mayor calidad (2).

Los modelos matemáticos son de mucha utilidad para el análisis y diseño de los procesos de secado. Para la modelación de la operación de secado se utilizan tanto modelos mecanicistas (6, 7) como empíricos (8, 9).

Aunque los modelos experimentales sólo interpretan de forma empírica los datos, son útiles para el diseño, especialmente cuando los problemas son excesivamente complicados (10). También son de gran utilidad para analizar el efecto de las variables del proceso sobre las cinéticas de secado. La complejidad del modelo depende de los propósitos de su aplicación.

El objetivo de este trabajo fue modelar las cinéticas de secado de papa en forma de cubos mediante dos modelos empíricos, el modelo de Peleg y el modelo de Weibull.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se utilizó papa var. Monalisa (82 a 85 % humedad), cultivada en España y adquirida en un mercado local de la ciudad de Valencia. Inmediatamente después de su recepción, fue almacenada en una cámara frigorífica a la temperatura de 4 ± 1 °C hasta su utilización.

El contenido de humedad de esta variedad se corresponde con el de variedades cultivadas en Cuba tales como Atlantic (80 a 83 %) y Santana (80 a 82 %), entre otras. La papa fue lavada, pelada y cortada en cubos de $8,7 \pm 0,2$ mm de arista de forma manual. Posteriormente las muestras fueron deshidratadas.

Las cinéticas de deshidratación se realizaron en un secador convectivo a escala de laboratorio con circulación perpendicular del aire descrito en la bibliografía (11).

Se realizaron experimentos a temperaturas del aire de secado igual a 30, 40, 50, 60 y 70 °C fijando la velocidad del aire en 9 m/s, lo que garantizó un lecho fluidizado. En los ensayos se empleó una densidad media de carga de $6,4 \pm 0,3$ kg/m². El peso de la muestra fue registrado de forma automática cada 5 min hasta una pérdida de peso del 80 %. Cada experimento fue realizado por triplicado. El contenido en humedad final de la muestra deshidratada se determinó según el método oficial de la AOAC (12).

Se utilizaron los modelos empíricos de Peleg (13, 14) y Weibull (13, 15). El modelo de Peleg tiene la forma según la ecuación 1:

$$W(t) = W_0 - \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

Donde W(t): humedad del producto (kg agua/kg ms), t: tiempo (s); W₀: humedad inicial del producto (kg agua/kg ms), k₁: constante de velocidad de Peleg (s[kg agua/kg ms]⁻¹), k₂: constante de capacidad de Peleg ([kg agua/kg ms]⁻¹).

La constante k₁ se considera un parámetro cinético (13). La constante k₂ se relaciona con el mínimo contenido de humedad alcanzable.

El modelo de Weibull se expresa de la forma siguiente en la ecuación 2:

$$W(t) = W_e + (W_o - W_e) \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (2)$$

Donde α y β : parámetros de forma y de escala, respectivamente; W_e : humedad de equilibrio.

El parámetro de forma α se considera un índice de comportamiento del producto en los procesos de secado, mientras que β se considera un coeficiente cinético cuando se hace la transposición a procesos de secado, quedando en él englobado el efecto de las variables de proceso.

Los parámetros de los modelos se determinaron utilizando el método de optimización no lineal del Gradiente Reducido Generalizado (GRG) disponible en la herramienta Solver de la hoja de cálculo Microsoft Excel 2013. Como función objetivo se consideró la planteada por la ecuación 3 considerando k_1 y k_2 y α y β como variables decisorias en la resolución de los modelos. La optimización se llevó a cabo con una precisión de 10^{-12} y un criterio de convergencia de 10^{-10} .

$$FO = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{i\text{exp}} - W_{i\text{calc}})^2}{N} \quad (3)$$

Donde $W_{i\text{exp}}$: humedad media adimensional experimental (kg agua/kg m.s), $W_{i\text{calc}}$: humedad adimensional media calculada por el modelo (kg agua/kg ms), N: número de medidas experimentales.

Para evaluar la bondad de cada ajuste se estimó el porcentaje total de varianza explicada (% var) y el error medio relativo (EMR). Valores del EMR inferiores al 10 % indican un ajuste razonable para la mayoría de los casos prácticos. Se realizaron análisis de varianza y rangos múltiples con el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1.

La dependencia de la temperatura de los parámetros cinéticos de ambos modelos, (k_1^{-1} para el modelo de Peleg y β^{-1} para el modelo de Weibull), fue descrita utilizando una ecuación de tipo Arrhenius (ecuación 4)

(4, 16). La energía de activación se puede determinar a partir de la pendiente de la representación gráfica del $\ln(K)$ frente a $(1/T)$.

$$K = (K_o)^{-1} \exp \left(\frac{-Ea}{RT} \right) \quad (4)$$

Donde K_o : factor pre-exponencial; Ea : energía de activación (kJ/kmol), R: constante de los gases perfectos (8,3144 kJ/kmol K), T: temperatura (K).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 1 representa las cinéticas de secado promedio de los cubos de papa a las diferentes temperaturas de secado estudiadas, expresadas como contenido de humedad media adimensional, $\psi = (W - W_e)/(W_o - W_e)$, frente al tiempo.

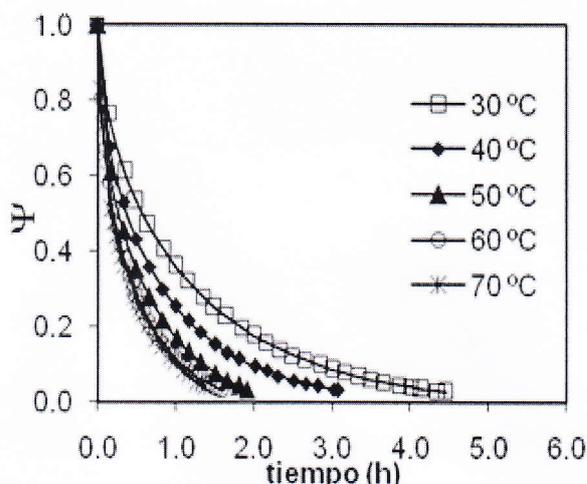


Fig. 1. Cinéticas de secado experimentales para las temperaturas bajo estudio ($v=9$ m/s).

La observación de las curvas de secado (Fig. 1) muestra que existe una influencia de la temperatura sobre la velocidad de secado del producto en el intervalo de valores estudiado. Se aprecia la tendencia a la disminución de los tiempos de secado con el aumento de la misma.

En el presente trabajo las cinéticas de secado son descritas mediante los modelos empíricos de Peleg (ec. 1) y Weibull (ec. 2).

Tabla 1. Parámetros del modelo de Peleg obtenidos para las diferentes condiciones de secado estudiadas y sus intervalos de confianza (p=0,05)

Temperatura (°C)	Velocidad aire (m/s)	k_1 (s [kg agua/kg ms] ⁻¹)	k_2 (kg agua/kg ms) ⁻¹	% var	EMR (%)
30	9	399,5 ± 14 ^a	0,18 ± 0,02 ^a	99,9	3,9
40	9	316,8 ± 20 ^b	0,17 ± 0,00 ^a	99,9	3,8
50	9	207,3 ± 11 ^c	0,18 ± 0,01 ^a	99,9	5,0
60	9	174,5 ± 11 ^d	0,17 ± 0,01 ^a	99,9	5,4
70	9	141,9 ± 14 ^d	0,17 ± 0,00 ^a	99,5	6,4

*Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (p>0,05).

Tabla 2. Parámetros del modelo de Weibull obtenidos para las diferentes condiciones de secado estudiadas y sus intervalos de confianza (p=0,05)

Temperatura (°C)	Velocidad aire (m/s)	β (s)	α	% var	EMR (%)
30	9	2957,1 ± 97 ^a	0,78 ± 0,08 ^a	99,9	3,6
40	9	2320,5 ± 95 ^b	0,78 ± 0,05 ^a	99,9	3,9
50	9	1597,1 ± 63 ^c	0,75 ± 0,01 ^a	99,9	5,1
60	9	1334,5 ± 98 ^d	0,78 ± 0,05 ^a	99,9	5,8
70	9	1075,4 ± 96 ^e	0,75 ± 0,02 ^a	99,8	6,2

*Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (p>0,05).

Los valores de los parámetros de los dos modelos obtenidos producto de la modelación se muestran en la Tabla 1 para el modelo de Peleg y la tabla 2 para el modelo de Weibull.

Se aprecia que ambos modelos describen de manera satisfactoria las cinéticas de secado de los cubos de papa; en todos los casos se obtuvo un porcentaje de varianza explicada (% var) superior al 99,5 % y un error medio relativo (EMR) inferior al 6,5 %.

Los parámetros k_1 y β mostraron una tendencia decreciente con la temperatura y por ende sus inversos, experimentan un comportamiento opuesto. El análisis de varianza indica que la temperatura del aire influye significativamente (p<0,05) en k_1^{-1} y β^{-1} (Tablas 1 y 2) y por consiguiente en la velocidad de la operación.

La constante k_2 del modelo de Peleg no presentó variaciones significativas (p>0,05) con la temperatura ni con la velocidad del aire de secado como se puede apreciar en la tabla 1, obteniéndose un valor medio igual a 0,18 ± 0,05. El parámetro k_2 es característico del material y no de-

pende de las condiciones de operación estudiadas. Este resultado es similar al obtenido para cúrcuma (13) y para setas (17, 18). Por otra parte, el valor del coeficiente de forma (0,77 ± 0,02) del modelo de Weibull tampoco varió significativamente (p>0,05) con la temperatura, según se aprecia en la tabla 2. Resultados similares fueron obtenidos por otros autores (13, 19).

Al analizar la influencia de la temperatura del aire de secado sobre los valores de k_1^{-1} y β^{-1} se aprecia que estos aumentan significativamente (p<0,05) conforme aumenta la temperatura del aire de secado. La Fig. 2 muestra la representación de $\ln(k_1^{-1})$ y de $\ln(\beta^{-1})$ frente al inverso de la temperatura, siguiendo una ecuación del tipo Arrhenius.

A partir de los valores de las pendientes de las rectas obtenidas en la Fig. 2 se calculó la energía de activación, 23,11 y 22,31 kJ/mol, para los modelos de Peleg y Weibull, respectivamente. La energía de activación representa la energía necesaria para extraer un mol de agua del producto. Los ajustes fueron satisfactorios, siendo R² superior al 98 % para ambos casos.

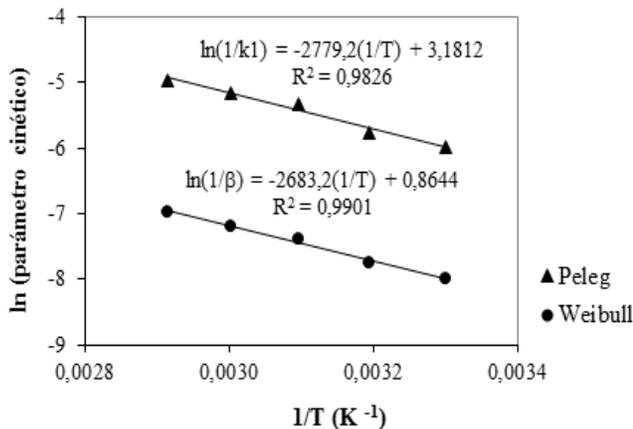


Fig. 2. Influencia de la temperatura del aire de secado sobre los parámetros cinéticos (k_1^{-1} , β^{-1}) de los modelos de Peleg y Weibull.

Los valores de E_a estimados son similares entre sí y del mismo orden que el presentado por otros autores para distintos productos vegetales tales como papa (12,0 a 24,2 kJ/mol) (2); (23,61 kJ/mol) (20), boniato (20,4 a 23,9 kJ/mol) (16), cúrcuma (26,1 a 38,5 kJ/mol) (13), zanahoria (28,36 kJ/mol) (8) y brócoli (18,6 kJ/mol) (21).

REFERENCIAS

- Hafezi, N.; Sheikhdavoodi, M. J. y Sajadiye, S. M. Int. J. Adv. Biol. Biom. Res. 2(11):2779-2782, 2014.
- Bakal, S. B.; Sharma, P. G.; Sonawan, S. P. y Verma, R. C. J. Food Sci. Technol. 19:127-135, 2011.
- Frías, A.; Clemente, G. y Mulet, A. Food Sci. Technol. Int. 16(4):337-341, 2010.
- Darvishi, H.; Khafajeh, H.; Banakar, A. y Lofti, M. Int. J. Agric. Crop Sci. 5(18):2009-2018, 2013.
- Chemkhi, S. y Zagrouba, F. Int. J. Food Eng. 7 (3): Artículo 8, 2011.
- Touil, A.; Chemkhi, S. y Zagrouba, F. J. Food Proc. Artículo ID 175402, 2014.
- Srikiatden, J. y Roberts, J. S. Int. J. Food Prop. 10:739-777, 2007.
- Doymaz, I. J. Food Eng. 61:359-364, 2004.
- Krokida, M. K.; Karathanos, V. T.; Maroulis, Z. B. y Marinos-Kouris, D. J. Food Eng. 59:391-403, 2003.
- Mulet, A. J. Food Eng. 22:329-348, 1994.
- Frías, A. *Cinética de secado por aire caliente de papa. Influencia de las condiciones de almacenamiento* (tesis doctoral, Instituto Superior José A. Echeverría, La Habana, Cuba) 2011, 142 p.
- AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Chemists, Washington D.C. 1997.
- Blasco, M.; García-Pérez, J. V.; Bon, J.; Carreres, J.E. y Mulet, A. Food Sci. Technol. Int. 12:315-323, 2006.
- Khin, M. M.; Zhou, W. y Perera, C. O. J. Food Eng. 77: 84-95, 2006.
- To?rul, I. y Pehlivan, D. J. Food Eng. 58:23-32, 2003.
- Falade, K. O.; Solademi, O. J. Int. J. Food Sci. Technol. 45:278-288, 2010.
- García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Bon, J.; Carreras, J. E. y Mulet, A. J. Sci. Food Agric. 85:1397-1404, 2005.
- García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Melis, R. y Mulet, A. J. Food Eng. 72:346-353, 2006.
- Cunha L. M.; Oliveira F. A. R.; Aboim A. P.; Frías J.M. y Pinheiro-Torres, A. J. Food Sci. Technol. 36(3):253-262, 2001.
- Srikiatden, J. y Roberts, J. S. J. Food Eng. 74:143-152, 2006.
- Mulet, A.; Sanjuán, N.; Bon, J. y Simal, S. Eur. Food Res. Technol. 210(2):80-83, 1999.

CONCLUSIONES

Los modelos estudiados Peleg y Weibull describen de forma satisfactoria las cinéticas de secado de los cubos de papa y por su simplicidad son de fácil utilización; para todas las cinéticas se obtuvieron porcentajes de varianza explicada superiores al 99,5 % y EMR inferiores a 10,5 %.

Los parámetros característicos de ambos modelos k_1 y β , están inversamente relacionados con la cinética de secado. Los valores de energía de activación (E_a) estimados (23,11 kJ/mol y 22,31 kJ/mol para los modelos Peleg y Weibull, respectivamente) son del mismo orden que el reportado por otros autores para diferentes productos vegetales.