

CINÉTICAS DE REHIDRATACIÓN DE PAPA DESHIDRATADA

Anabel Frías^{1*}, Silvia Bayarri², Nieves Sanjuán², Gabriela Clemente² y Antonio Mulet²

¹Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría"

Ave. 114, No 11 901, La Habana, Cuba, CP 19 390

²Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia, C/Camino de Vera, s/n, 46 022, Valencia, España.

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

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las cinéticas de rehidratación de papa deshidratada a diferentes temperaturas de rehidratación (25, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C), mediante un modelo difusivo. Se observó un incremento de la velocidad de rehidratación con la temperatura del agua. El modelo permitió describir adecuadamente el proceso de rehidratación (porcentaje de varianza explicada > 97,0). El contenido de humedad de equilibrio (We) del material fue similar para todas las condiciones estudiadas. La influencia de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectiva (De) se interpretó por el modelo de Arrhenius, con una energía de activación de 21,2 kJ/mol.

Palabras clave: Rehidratación, cinética, difusión, papa.

ABSTRACT

Kinetics of rehydration of dried potato

The kinetics of rehydration of dried potato at different rehydration temperatures (25, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C), using a diffusion model was studied. The rehydration rate increased with the water temperature. The model described the rehydration process properly (explained variance percentage > 97.0). The equilibrium moisture content of the product was similar for all studied conditions. The temperature influence on the effective diffusion coefficient (De) was interpreted by the Arrhenius model, with an activation energy of 21.2 kJ/mol.

Keywords: Rehydration, kinetic, diffusion, potato.

INTRODUCCIÓN

El secado o deshidratación es una operación que permite incrementar la estabilidad durante el almacenamiento de frutas y vegetales permitiendo su disponibilidad durante todo el año. En los últimos años se ha incrementado la demanda de vegetales deshidratados lo que ha provocado un aumento en su demanda. La papa deshidratada como ingrediente de sopas instantáneas constituye un ejemplo de aplicación (1).

El secado induce muchos cambios físicos y químicos en el material, por lo que las propiedades del alimento no podrán ser restauradas por simple adición de agua (2,3). La rehidratación puede ser considerada como una medida de los daños causados al material por el secado y los tratamientos previos a la deshidratación (4). El estudio de las cinéticas de rehidratación, como indicador de calidad, puede ser muy útil para optimizar el proceso de deshidratación.

*Anabel Frías Chirino: Ingeniera química (ISPJAE, 1997). Máster en Análisis y Control de Procesos Químicos (ISPJAE, 2004). Profesora Asistente de la Facultad de Ingeniería Química (ISPJAE). Desarrolla su quehacer investigativo en el campo de la deshidratación de frutas y vegetales. Ha participado en eventos de carácter internacional de la temática como: EURDrying2003 y AFSIA 2005.

Con el fin de modelar las cinéticas de rehidratación de vegetales se han planteado diferentes modelos: empíricos y semiempíricos (5-7), así como modelos difusivos basados en la segunda ley de Fick (7-9). Los trabajos disponibles sobre rehidratación de papa son pocos y abordan principalmente los cambios en las propiedades estructurales (densidad real, densidad aparente, porosidad, volumen específico) (2,3) y nutricionales (10). Otros autores (11) investigaron la rehidratabilidad de cilindros de papa sometidos a secado por microondas y secado convectivo. Ninguno de estos trabajos propone modelos cinéticos para describir la rehidratación de este producto.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la temperatura del agua en la rehidratación de papa deshidratada y aplicar un modelo difusivo para la descripción de la cinética de esta operación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó como materia prima papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Monalisa, cultivada en España y adquirida en un mercado local de Valencia. Inmediatamente después de su recibo, fue almacenada en una cámara frigorífica a 2 °C, aproximadamente 10 días, hasta su utilización. La papa fue debidamente lavada, pelada y cortada en cubos de 1cm de lado. Posteriormente se procedió a su escaldado en agua caliente (90 ± 1 °C) durante 3 min y a continuación se enfriaron en agua destilada a 20 °C durante 2 min (12). Las muestras así escaldadas se secaron durante 5,5 h a 60 °C en un secador de bandejas con circulación perpendicular del aire. La velocidad del aire de secado fue de 1 m/s, con 62 % de recirculación. El producto deshidratado se envasó en bolsas de plástico de poliestireno expandido y se dispuso en una cámara a 4 °C durante 24 h para permitir la homogeneización de las muestras. La humedad final del producto fue de 12,5 ± 0,12 kg/100 kg de materia seca. El contenido en humedad se determinó según el método oficial de la AOAC (13).

La papa deshidratada se rehidrató por inmersión en 400 mL de agua destilada a temperatura controlada en un termostato. Se estudiaron las temperaturas de rehidratación de: 25, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C. Cada experiencia se realizó por triplicado utilizando una cantidad de producto de 5 ± 0,2 g. La rehidratación se consi-

deró finalizada cuando la ganancia de peso de la muestra fue inferior a 0,01 g. Se registró la evolución del peso de la muestra durante el proceso, inicialmente cada 5 min por espacio de 30 min, con posterioridad se midió cada 10 min hasta completar la primera hora, a continuación se tomaron 15 min durante la siguiente media hora y cada 30 min hasta completar las 3 h de rehidratación y a partir de este momento se midió cada una hora hasta finalizar esta. De manera previa al pesado, las muestras fueron extraídas del agua dejándose escurrir durante 2 min para eliminar el agua superficial.

Para modelar la cinética de rehidratación se consideró que el transporte de agua desde la superficie al interior del sólido tiene lugar principalmente por difusión, lo que permite que los resultados experimentales puedan ser analizados en términos de la ley de Fick, y así calcular un coeficiente de difusión efectiva. Al combinar la ley de Fick con el balance microscópico de la transferencia de masa, se obtiene una ecuación diferencial que para una simetría cúbica toma la siguiente forma (14):

$$\frac{\partial Wp}{\partial t} = -De \left(\frac{\partial^2 Wp}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Wp}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Wp}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Donde:

Wp: contenido de humedad puntual (kg/kg m.s);

T: tiempo (s);

De: coeficiente de difusión efectivo (m²/s);

x, y, z: longitudes en las coordenadas respectivas (m).

Para la solución de esta ecuación diferencial se hicieron las siguientes suposiciones: el contenido de humedad inicial de la pieza es uniforme; la geometría del sólido y con ello su volumen, así como el coeficiente de difusión efectiva permanece constante durante todo el proceso; la humedad en la superficie alcanza el valor de saturación instantáneamente en el momento de sumergir la pieza en el agua.

Las condiciones de contorno consideradas están relacionadas tanto con el equilibrio termodinámico como con la simetría del sólido. La condición inicial fue el contenido de humedad de la muestra al comienzo del proceso.

La resolución de este modelo, tomando en consideración las suposiciones anteriores, se llevó a cabo analíticamente mediante el método de separación de variables. Para ello las humedades fueron expresadas de forma adimensional.

$$\psi(x, y, z, t) = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} \quad (2)$$

Donde:

W: contenido de humedad promedio (kg/kg m.s.);

W_e: contenido de humedad de equilibrio (kg/kg m.s.);

W_o: contenido de humedad inicial (kg/kg m.s.).

Integrando la ecuación obtenida para el volumen total de la pieza, se obtuvo una ecuación que permite calcular el contenido de humedad adimensional promedio del cubo para cada instante de tiempo (ec. 3) (15). El número de términos del desarrollo en serie utilizados fue 50.

$$\psi(x, y, z, t) = \frac{8^3}{\pi^6} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4L} \left(\frac{D_e t}{L} \right) \right] \right)^3$$

Donde: (3)

Ψ: contenido de humedad adimensional promedio;

L: semiespesor de la muestra (m).

Los valores de D_e y W_e se determinaron utilizando el método de *Newton* disponible en la herramienta SOLVER de la hoja de cálculo Excel, minimizando la suma de las diferencias al cuadrado entre el contenido de humedad experimental y el calculado por el modelo. La función objetivo viene expresada por la ec. 4.

$$FO = \sum_{i=1}^N \frac{(\Psi_{i \text{ exp}} - \Psi_{i \text{ calc}})^2}{N} \quad (4)$$

Donde:

Ψ_{i exp}: humedad media adimensional experimental (kg/kg m.s);

Ψ_{i calc}: humedad media adimensional calculada por el modelo (kg/kg m.s);

N: número de medidas experimentales.

La dependencia de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectiva puede ser representado por una relación de tipo *Arrhenius* (ec. 5)

$$D_e = D_o \exp \left(\frac{-E_a}{R(T + 273)} \right) \quad (5)$$

Donde:

E_a: energía de activación (kJ/mol);

R: constante de los gases ideales (8,314x10⁻³ kJ/K mol).

Para evaluar la bondad del ajuste se determinó a partir de cálculo del coeficiente de determinación múltiple o porcentaje de varianza explicada (% var) (8).

$$\% \text{ var} = \left[1 - \frac{S_{yx}}{S_y} \right]^{1/2} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

S_{yx} y S_y: se definen como se indica en las ecuaciones siguientes, siendo los valores que se desean comparar, teóricos y experimentales;

Ψ_{exp_m}: media de los valores experimentales:

$$S_{yx} = \frac{\sum (\Psi_{calc} - \Psi_{exp})^2}{N - 2} \quad (7)$$

$$S_y = \frac{\sum (\Psi_{calc} - \Psi_{exp_m})^2}{N - 1} \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig.1 muestra las curvas promedio de ganancia de humedad con el tiempo para algunas de las temperaturas estudiadas. La temperatura influye sobre la rehidratación, principalmente en las etapas iniciales. Todas tienen una dinámica de ganancia de humedad similar.

La Fig. 2 representa la velocidad de rehidratación (dW/dt), frente al contenido de humedad de la muestra. La velocidad de hidratación aumentó con la temperatura hasta contenidos de humedad menores que 3 kg/kg m.s., siendo mayor para las temperaturas más elevadas. A partir de este valor de humedad la velocidad de hidratación disminuyó notablemente alcanzando un valor muy similar para todos los casos, se comprobó que para valores de humedad mayores e iguales a 3,15 kg/kg m.s. las velocidades de rehidratación no varían significativamente ($p \leq 0,05$).

La Tabla 1 presenta los valores de difusividad efectiva (D_e) y el contenido de humedad de equilibrio (W_e) identificados a diferentes temperaturas a partir del modelo propuesto (ec.3) indicándose además el intervalo de confianza de los mismos ($\hat{\alpha} = 0,05$) y el porcentaje de

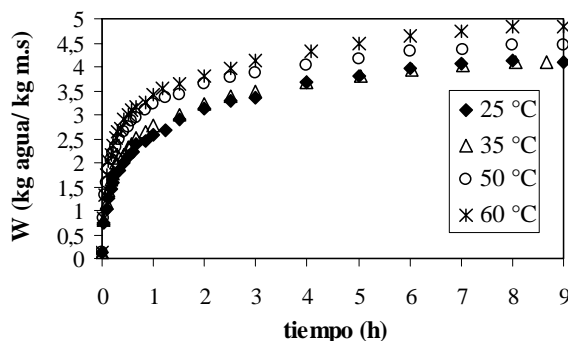


Fig. 1. Curvas experimentales de rehidratación de papa deshidratada a diferentes temperaturas.

varianza explicada para cada variante. Se puede observar que el coeficiente de difusividad efectiva aumenta con la temperatura. El análisis de varianza mostró la existencia de diferencias significativas entre los valores de D_e obtenidos para los diferentes niveles de temperatura estudiados ($p \leq 0,05$), corroborándose la influencia de la temperatura del agua de rehidratación sobre las cinéticas de rehidratación.

Los valores de W_e son muy similares para todas las condiciones ensayadas observándose por inspección visual un ligero incremento con la temperatura. De forma general el análisis de varianza muestra dos grupos de datos con diferencias significativas entre ellos ($p \leq 0,05$). Para el primer grupo, formado por las temperaturas de rehidratación 25 y 35 °C, se obtiene un valor de W_e medio igual a 3,99 kg/kg m.s. y para el segundo grupo, formado por las restantes temperaturas estudiadas 45, 50, 55 y 60 °C, se obtiene un valor de W_e medio igual a 4,46 kg/kg m.s. Muchos autores (16-18) consideran que, cuando se rehidrata, la W_e es un parámetro constante para cada producto, independientemente de la temperatura. A su vez se conoce que la capacidad de los productos biológicos para absorber agua está relacionada con el tipo de material, su estructura y la composición química de las células, por lo tanto, cambios en la estructura química o física del material puede provocar variaciones de la W_e vinculada a la rehidratación de algunos productos en particular. De esta forma, es posible encontrar estudios en la

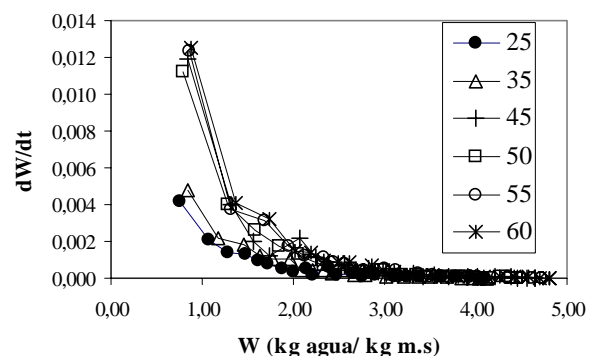


Fig. 2. Efecto de la temperatura de rehidratación sobre la velocidad de rehidratación.

Tabla 1. Parámetros del modelo difusivo: D_e y W_e , y sus intervalos de confianza ($\alpha = 0,05$)

T (°C)	$D_e \cdot 10^{10}$ (m ² /s)	W_e (kg/kg m.s)	Varianza Explicada (%)
25	4,7 ± 0,3 ^a	4,0 ± 0,1 ^a	99,2
35	6,3 ± 0,2 ^b	4,0 ± 0,0 ^a	99,6
45	8,0 ± 0,6 ^c	4,4 ± 0,1 ^b	97,9
50	8,9 ± 0,6 ^d	4,5 ± 0,4 ^b	97,7
55	9,3 ± 0,3 ^{de}	4,4 ± 0,1 ^b	97,6
60	9,7 ± 0,5 ^e	4,6 ± 0,2 ^b	97,0

*Letras diferentes representan diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

literatura donde la W_e resulta ser dependiente de la temperatura (7,8) y otros donde la dependencia de la temperatura es casi nula o muy poca (16, 17).

El grado de ajuste del modelo difusivo disminuyó con el aumento de la temperatura, aunque en todos los casos la varianza explicada fue superior a 97 %.

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre D_e , los valores mostrados (Tabla 1) se ajustaron de acuerdo al modelo de *Arrhenius* (Fig. 3). A partir de la pendiente del gráfico fue posible calcular la energía de activación del proceso que fue de $E_a = 17,8$ kJ/mol ($R^2 = 97$ %), dicho valor es similar a otros resultados de la literatura (7, 8).

$$\ln D_e = \frac{-2137.2}{T + 273} - 14.271 \quad R^2 = 97,3 \text{ \%} \quad (9)$$

La ec. 9 permite predecir los valores de D_e a diferentes temperaturas, siempre que estén contempladas en el rango de temperaturas estudiadas (25 a 60 °C). La sustitución de este resultado en la ec. 3 conduce a un modelo capaz de simular el proceso de rehidratación de papa deshidratada en forma de cubos (ec. 10) para cualquier temperatura considerada.

La comprobación de la robustez de un modelo puede llevarse a cabo a través de la evaluación de los resultados obtenidos al utilizarlo para simular el proceso analizado en condiciones diferentes a las empleadas en la obtención del modelo.

La Fig. 4 presenta la simulación del modelo obtenido por la ec. 10 para una temperatura de rehidratación igual a 40 °C. Se puede observar que existió una buena correspondencia entre los resultados experimentales y los calculados por el modelo con una varianza explicada igual a 99,38 %, lo que corrobora la calidad del ajuste.

$$\psi(x, y, z, t) = \frac{8^3}{\pi^6} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4L^2} \exp \left(-2137.2 \frac{1}{T+273} - 14.271 \right) t \right] \right)^3 \quad (10)$$

CONCLUSIONES

El modelo empleado describe adecuadamente las cinéticas de rehidratación. La velocidad de rehidratación de la muestra aumentó con la temperatura del agua de rehidratación. El efecto de la temperatura de rehidratación sobre la difusividad efectiva fue descrito mediante la ecuación de *Arrhenius* con un valor de energía de activación igual a 17,8 kJ/mol. Se observaron diferencias significativas entre los valores de humedad de equilibrio de las muestras y se aprecia un ligero incremento de *We* con el aumento de la temperatura de rehidratación.

REFERENCIAS

1. Varnalis, A.; Brennan, J.; MacDougall, D. y Gilmour, S. J. *Food Eng.* 61: 153-163, 2004.
2. Witrowa-Rajchert D. y Lewicki P. *Drying 98'*-Proc. International Drying Symposium, Halkidiki, Grecia, Agosto 19-22. vol (B): 1244-1250, 1998.
3. Krokida, M. y Maroulis, Z. *J. Food Sci. Technol.* 36: 529-538, 2001.
4. Lewicki, P. *J. Food Eng.* 36: 81-87, 1998.
5. Turhan, M.; Sayar, S. y Gunasekaran, S. *J. Food Eng.* 53: 153-159, 2002.
6. Pascual, P.; Sanjuán, N.; Melis, R. y Mulet, A. *J. Food Eng.* 72: 346-353, 2006.
7. Pascual, P.; Sanjuán, N.; Bon, J.; Carreras, J. y Mulet, A. *J. Sci. Food Agric.* 85:1397-1404, 2005.
8. Sanjuán, N.; Cárcel, J.; Clemente, G y Mulet, A. *Eur. Food Res. Technol.* 212: 249-453, 2001.
9. Bilbao-Sáinz, C.; Andrés, A. y Fito, P.J. *Food Eng.* 68: 369-376, 2005.
10. Bobic, Z.; Bauman, I. y Curic, D. *Sadhana* 27: 365-374, 2002.
11. Khraisheh, M.A.; McMinn, W. y Magee, T. *Food Res. Int.* 37: 497-503, 2004.
12. Maté, J.; Quartaert, G.; Meerdink, G. y Van 't Riet, K. *J. Agric. Food Chem.* 46: 676-681, 1998.
13. AOAC. *Official Methods of Analysis, Washington D.C. Association of Official Chemists*, 1997.
14. Rosselló, C.; Cañellas, J.; Simal, S. y Berna, A. *J. Agric. Food Chem.* 40: 2374-2378, 1992.
15. Frías, A.; Clemente, G; Rosselló, C. y Mulet, A. Kinetics of fluidized bed drying of potato. Proc. Symposium EUDrying'03. Universidad Nacional Técnica de Atenas (NTA). Heraklion, Creta, 4 -5 Septiembre: 224 - 229, 2003.
16. Sopade, P.; Ajisegiri, E. y Bakau, M. *J. Food Eng.* 15: 269-283, 1992.
17. Sopade, P. y Kaimur, K. *Drying Technol.* 17 (4 &5): 975-989, 1999.