



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO A BAJA TEMPERATURA EN LA CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN Y EN LA TEXTURA DE BERENJENA Y ZANAHORIA

MÁSTER EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

Juan Vicente Santacatalina Bonet

Directores: Juan Andrés Cárcel Carrión

José Vicente García Pérez

Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios
Departamento de Tecnología de Alimentos
Universidad Politécnica de Valencia

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO A BAJA TEMPERATURA EN LA CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN Y EN LA TEXTURA DE BERENJENA Y ZANAHORIA

Juan Vicente Santacatalina, Juan A. Cárcel y José Vicente García-Pérez¹

RESUMEN

La deshidratación representa una operación muy importante en la industria alimentaria. El modo en el que se extrae el agua de los alimentos afecta a la calidad final del producto, por tanto las características de los productos deshidratados dependen del método de secado utilizado. El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia del secado a baja temperatura en la calidad de la berenjena y la zanahoria deshidratadas.

Para alcanzar este objetivo, se obtuvieron muestras cúbicas (10 mm de lado) de berenjena (*Solanum melongena* var. Black Enorma) y zanahoria (*Daucus carota* var. Nantesa). Las muestras se deshidrataron utilizando tres técnicas diferentes: secado por aire caliente (SAC, 50 °C y 2 m/s), liofilización a presión atmosférica (LPA, -14 °C y 2 m/s) y liofilización a vacío (LV). Para evaluar la influencia del método de secado en la calidad final del producto deshidratado, se obtuvieron las cinéticas de rehidratación de las muestras SAC, LPA y LV. Asimismo, se realizó análisis del perfil de textura (TPA) para caracterizar la dureza de las muestras rehidratadas. Por otra parte, se utilizó un modelo difusivo para describir matemáticamente las cinéticas de secado y rehidratación de ambos productos.

Las cinéticas de secado de berenjena fueron mucho más rápidas que las de zanahoria, tanto en SAC como en LPA. El método de secado influyó significativamente ($p < 0.05$) tanto en el comportamiento en la rehidratación como en las propiedades texturales de berenjena y zanahoria. Las muestras LPA mostraron propiedades intermedias entre las muestras LV y SAC. Así, la LPA puede representar una alternativa interesante para obtener productos deshidratados de elevada calidad a menor coste que la LV.

PALABRAS CLAVE: deshidratación; rehidratación; difusión; textura.

RESUM

La deshidratació representa una operació molt important en la indústria alimentària. La manera d'extraure l'aigua dels aliments afecta a la qualitat final del producte, per tant les característiques dels productes deshidratats depenen del mètode d'assecat utilitzat. El principal objectiu d'aquest treball fou avaluar la influència de l'assecat a baixa temperatura en la qualitat de l'albergínia i la carlota deshidratades.

¹ Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camí de Vera s/n, E46022, Valencia. Tel.:+34 96 387 93 76

Per a aconseguir aquest objectiu, es van obtenir mostres cúbiques (10 mm de costat) d'albergínia (*Solanum melongena* var. Black Enorma) i carlota (*Daucus carota* var. Nantesa). Les mostres es van deshidratar utilitzant tres tècniques diferents: assecat per aire calent (SAC, 50 °C i 2 m/s), liofilització a pressió atmosfèrica (LPA, -14 °C i 2 m/s) i liofilització a buit (LV). Per a avaluar la influència del mètode d'assecat en la qualitat final del producte deshidratat, es van obtenir les cinètiques de rehidratació de les mostres SAC, LPA i LV. També es realitzaren anàlisis del perfil de textura (TPA) per a caracteritzar la duresa de les mostres rehidratades. D'altra banda, es va utilitzar un model difusiu per a descriure matemàticament les cinètiques d'assecat i rehidratació d'ambdós productes.

Les cinètiques d'assecat d'albergínia van ser molt més ràpides que les de carlota, tant en SAC com en LPA. El mètode d'assecat va influir significativament ($p < 0.05$) tant en el comportament en la rehidratació com en les propietats texturals d'albergínia i carlota. Les mostres LPA van mostrar propietats intermèdies entre les mostres LV i SAC. Així, la LPA pot representar una alternativa interessant per a obtenir productes deshidratats d'elevada qualitat a menor cost que la LV.

PARAULES CLAU: deshidratació; rehidratació; difusió; textura.

ABSTRACT

Dehydration represents a very important operation in food processing. The way how water is removed from food affects the final product quality, thus the characteristics of dried products are dependent on the drying technique used. The main objective of the present study was to evaluate the effect of low temperature drying on the quality of dried eggplant and carrot.

For this purpose, cubic samples (10 mm side) were obtained from eggplants (*Solanum melongena* var. Black Enorma) and carrots (*Daucus carota* var. Nantesa). Samples were dehydrated using three different drying techniques: hot air drying (HAD, 50 °C and 2 m/s), atmospheric freeze drying (AFD, -14 °C and 2 m/s) and vacuum freeze drying (VFD). To evaluate the influence of drying method on the final quality of the product, rehydration kinetics of HAD, AFD and VFD samples were performed. Moreover, textural profile analyses (TPA) were carried out to characterize the hardness of the rehydrated samples. A diffusion model was used to mathematically describe drying and rehydration kinetics.

The drying kinetics of eggplant were faster than carrot drying kinetics in both HAD and AFD. Drying method influenced significantly ($p < 0.05$) in both rehydration behaviour and textural properties. AFD samples showed intermediate properties between VFD and HAD samples. Therefore, AFD could represent an interesting alternative to HAD and VFD to achieve high quality dried products at lower cost than VFD.

KEYWORDS: dehydration; rehydration; diffusion; texture.

INTRODUCCIÓN

El secado es un método clásico para conservar alimentos que, además de prolongar su vida útil, tiene la ventaja de reducir el peso para su transporte y las necesidades de espacio para su almacenamiento (Ertekin y Yaldiz, 2004). El secado incrementa la estabilidad de los alimentos porque reduce su actividad de agua, limitando así la actividad microbiológica y los cambios físicos y químicos que se producen durante el almacenamiento (Mayor y Sereno, 2004). Sin embargo, el secado produce una pérdida de calidad en el producto debido a que induce cierto colapso estructural y cambios bioquímicos. Así, en el secado por aire caliente, la pérdida de agua y el calentamiento producen estrés en la estructura celular del alimento provocando cambios en su microestructura (por ejemplo la formación de poros) y el encogimiento de las muestras. Obviamente, la degradación de la calidad del alimento depende de la técnica de secado utilizada y de la temperatura de secado. Además, los cambios estructurales son más acusados en los alimentos que presentan una elevada porosidad, como es el caso por ejemplo de la berenjena.

Existen diferentes técnicas para la obtención de productos deshidratados. El secado por aire caliente es una de las tecnologías de secado más utilizadas en la industria alimentaria porque es una operación sencilla y requiere inversiones iniciales relativamente bajas. Con esta técnica se obtienen productos deshidratados bastante homogéneos y con una larga vida útil. No obstante, el secado por aire caliente puede afectar negativamente a la calidad final del producto debido a las altas temperaturas utilizadas, y especialmente a los componentes más termolábiles.

Por el contrario, la liofilización a vacío utiliza bajas temperaturas de secado y un ambiente con ausencia de oxígeno, lo que ayuda a mejorar la calidad y el valor nutritivo de los productos deshidratados (Wu et al., 2007). Sin embargo, se trata de una operación muy cara debido, entre otras causas, a la baja velocidad de secado y a la necesidad de trabajar por lotes. Esta es la razón por la que sólo se utiliza para el procesado de productos de alto valor añadido. Además, la liofilización a vacío puede producir importantes pérdidas de compuestos volátiles, lo que hace que los productos liofilizados a veces se describan como insípidos (Lin et al., 1998).

La liofilización a presión atmosférica puede representar una técnica con características intermedias que permita la obtención de productos de mayor calidad que los obtenidos con el secado por aire caliente pero con un coste menor que en el caso de la liofilización a vacío (Alves-Filho et al., 2007). Así, esta técnica podría convertirse en una alternativa interesante con la que obtener productos deshidratados que mantengan bien las características nutricionales y organolépticas del producto fresco, aprovechando la actual demanda de productos de calidad a precios económicos.

El secado es un proceso complejo en el que se produce una transferencia simultánea de materia y de calor, acompañada de cambios físicos y estructurales. La modelización constituye una herramienta necesaria para analizar los procesos de secado y la influencia de las condiciones de operación (Mulet et al., 2010). Los modelos de secado se

formulan teniendo en cuenta una serie de simplificaciones de la realidad. La más común es considerar que la transferencia de materia dentro del alimento se produce únicamente por los gradientes de humedad, lo que se conoce como mecanismo difusivo (Ortuño et al., 2010). Así, la modelización de las cinéticas de secado permite obtener parámetros como la difusividad efectiva del producto, parámetro esencial para abordar la optimización del proceso de secado (Hassini et al., 2007).

La obtención de productos deshidratados nuevos, de calidad y atractivos para el consumidor es necesaria para diversificar mercados (Askari et al., 2009). Es el caso por ejemplo de la berenjena, una hortaliza importante en el área mediterránea y asiática pero que presenta una vida útil muy limitada para su consumo en fresco. El secado constituye una alternativa para proporcionar estabilidad al producto y facilitar su transporte a mercados externos o su consumo durante todo el año (Akpınar y Bicer, 2005). La berenjena deshidratada puede ser usada como un nuevo ingrediente en alimentos como sopas y salsas. Otro ejemplo de producto con una porosidad totalmente distinta es la zanahoria, una hortaliza ampliamente cultivada en España y otros países europeos. En los últimos años el consumo de zanahoria en fresco se ha incrementado debido a su alto valor nutritivo (alto contenido en vitaminas y minerales) y al reconocimiento de las propiedades antioxidantes y anticancerígenas del β -caroteno. En la industria alimentaria, especialmente en la de productos instantáneos, la zanahoria se utiliza principalmente en forma deshidratada (Suvarnakuta et al., 2005). Así pues, es muy importante que el método de secado utilizado conserve al máximo las propiedades originales de la zanahoria, como por ejemplo su estructura o el contenido de β -caroteno.

La calidad de los alimentos deshidratados normalmente es menor que la del producto fresco ya que durante el secado se afecta la capacidad de rehidratación, la textura y otras características (Ratti, 2001). Por otro lado, la mayoría de los productos deshidratados se rehidratan antes de ser consumidos. Por tanto, es necesario conocer el comportamiento del producto deshidratado cuando se sumerge en el agua. El ablandamiento y la pérdida de la textura original es uno de los principales problemas que aparecen en los productos rehidratados, parámetros que tienen una gran importancia en la aceptabilidad final del producto. Para evaluar las propiedades texturales de los productos rehidratados se puede recurrir a determinaciones instrumentales como el análisis del perfil de textura que proporciona medidas objetivas del daño sufrido por los tejidos durante la operación de secado.

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de diferentes técnicas de secado en la capacidad de rehidratación y en la textura de berenjena y zanahoria, dos productos de estructura muy diferente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se obtuvieron muestras de geometría cúbica (10 mm de lado) de la pulpa de berenjenas (*Solanum melongena* var. Black Enorma) y de zanahorias (*Daucus carota* var. Nantesa) de origen español utilizando un utensilio de corte doméstico. Las muestras destinadas a las experiencias de secado por aire caliente se procesaron inmediatamente después de cortarlas. Por el contrario, las destinadas a ser deshidratadas mediante liofilización a vacío o a presión atmosférica se envolvieron en un film plástico, se congelaron (-18 ± 1 °C) y se almacenaron durante 24 horas antes de proceder a su secado. El contenido de humedad inicial de las muestras se determinó por diferencia de peso, colocando las muestras en una estufa a 70 °C y 200 mmHg hasta que alcanzaron un peso constante (AOAC, 1997).

Experiencias de secado

Las experiencias de secado se realizaron utilizando tres métodos diferentes: secado por aire caliente (SAC), liofilización a presión atmosférica (LPA) y liofilización a vacío (LV). Para todos los casos (SAC, LPA y LV) las experiencias se realizaron, al menos, por triplicado y se extendieron hasta que las muestras perdieron el 90% de su peso inicial en el caso de la berenjena y el 80% para las muestras de zanahoria. Estos límites se determinaron mediante experiencias previas y logran reducir la actividad de agua a niveles que aseguran la conservación de las muestras.

SECADO POR AIRE CALIENTE

La determinación de las cinéticas de secado por aire caliente se llevó a cabo en un secadero convectivo, ya descrito anteriormente (García-Pérez et al., 2009). El secadero funciona de forma completamente automática. La temperatura de secado (50 ± 1 °C) y la velocidad del aire (2 m/s) se controlaron mediante un algoritmo PID y las muestras se pesaron a tiempos predefinidos mediante la combinación de dos sistemas neumáticos y un PLC (CQM41, Omron, Japón).

LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Las experiencias de liofilización a presión atmosférica se realizaron en un secadero convectivo con recirculación de aire (Figura 1) situado en el interior de una cámara frigorífica que permitía el secado a baja temperatura. Las cinéticas se realizaron a una velocidad de aire de 2 m/s y una temperatura de -14 ± 1 °C. Con el objeto de mantener un gradiente de humedad que facilitara el secado, se mantuvo la humedad relativa del aire a 10 ± 1 % haciendo pasar el flujo por un lecho de sílica gel. La velocidad de aire en el secadero se controló mediante un algoritmo PID. Las muestras se pesaron de forma manual durante el secado a tiempos definidos previamente.

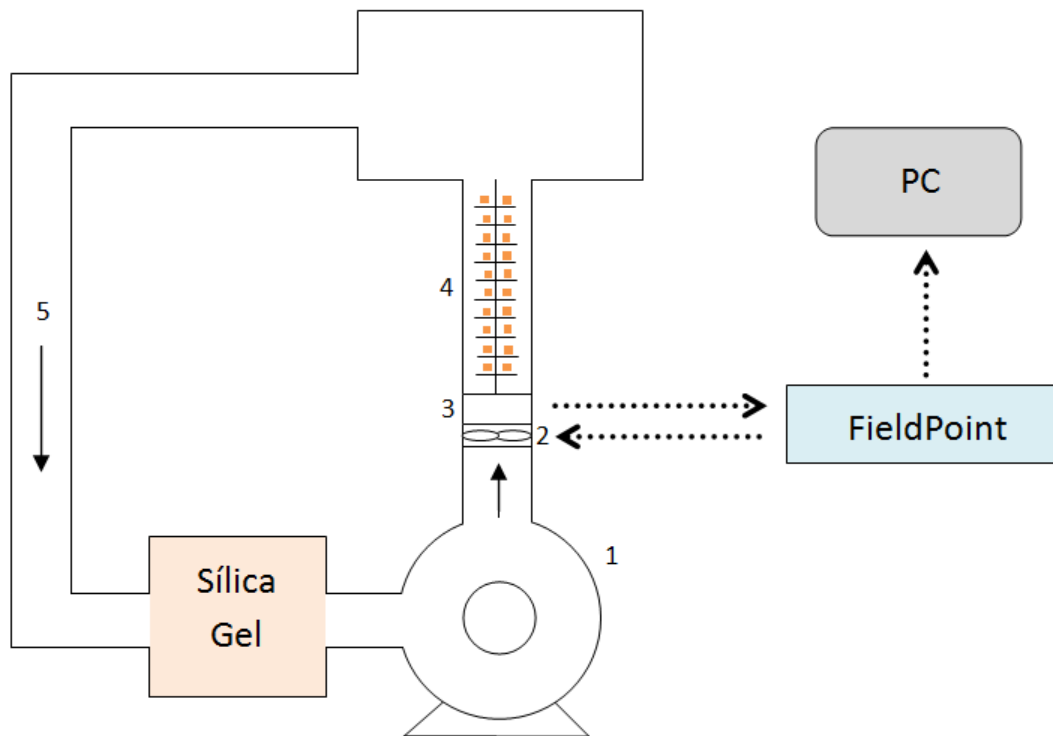


FIGURA 1. Diagrama del secadero LPA con recirculación de aire. 1. Soplante. 2. Anemómetro. 3. Sondas de temperatura y humedad relativa. 4. Cámara de secado. 5. Sentido del flujo de aire.

LIOFILIZACIÓN A VACÍO

Las muestras liofilizadas a vacío se obtuvieron utilizando un liofilizador (Telstar, Lioalfa-6, Alemania) que trabaja a 10^{-3} mbar y -45 °C. Debido a que este equipo funciona a vacío y de forma discontinua, no se pudieron obtener las cinéticas de secado para las muestras liofilizadas a vacío. Las muestras se mantuvieron durante 24 horas en el equipo, lo que permitió alcanzar la misma pérdida de peso que con los secados SAC y LPA.

Experiencias de rehidratación

Las muestras de zanahoria y berenjena deshidratadas por los diferentes sistemas ensayados (SAC, LPA y LV) se rehidrataron en un baño termostático con agua destilada a 25 ± 1 °C hasta que alcanzaron un peso constante. Se realizaron al menos 3 repeticiones.

Textura

Las propiedades texturales de las muestras frescas y rehidratadas se midieron utilizando un texturómetro TA-XT2 (SMS, Godalming, Reino Unido) equipado con una célula de carga de 25 kg. El análisis del perfil de textura (TPA) de las muestras cúbicas se llevó a cabo con dos ciclos de compresión

entre platos paralelos utilizando una sonda plana de aluminio de 75 mm de diámetro (SMS P/75). La compresión se realizó hasta el 25% de deformación y se aplicó un periodo de tiempo entre ciclos de 5 s. La dureza (fuerza máxima) se calculó a partir de los perfiles de esfuerzo/deformación. Para cada conjunto de muestras (SAC, LPA, LV rehidratadas y frescas) tanto en berenjena como en zanahoria se realizaron un mínimo de 10 repeticiones.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) ($p < 0.05$) y de diferencias mínimas significativas (LSD, Least Significant Difference) utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1. (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, USA), con el objetivo de evaluar si el método de secado tuvo una influencia significativa en la dureza de las muestras rehidratadas.

Modelización de las cinéticas de secado

Para describir matemáticamente las cinéticas de secado (SAC y LPA) de los cubos de berenjena y zanahoria se utilizó un modelo difusivo. La ecuación diferencial de difusión se obtiene combinando la ley de Fick y el balance microscópico de materia. En la Ec. 1 se muestra dicha ecuación para una geometría cúbica, considerando la difusividad efectiva constante y la homogeneidad e isotropía del sólido.

$$\frac{\partial W_p(x, y, z, t)}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

donde: W_p = contenido de humedad local (kg w/kg m.s.); t = tiempo (s); D_e = difusividad efectiva (m^2/s); x, y, z = coordenadas características (m).

Para abordar la resolución de la Ec. 1 se necesitan una serie de condiciones iniciales y de contorno. En este caso se consideró:

- la simetría del sólido.
- que el contenido inicial de humedad y la temperatura fueron homogéneos en toda la muestra.
- que el tamaño de la muestra permaneció constante durante el secado.
- que la resistencia externa a la transferencia de agua fue despreciable frente a la resistencia interna. Por tanto, la superficie de la muestra se encuentra en equilibrio con el aire durante el tiempo de secado.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la solución analítica a la ecuación de difusión se expresa en términos de contenido en humedad adimensional, $\psi(t)$, en la Ec. 2 (Crank, 1975).

$$\psi(t) = \frac{W(t) - W_e}{W_0 - W_e} = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right)} \right]^3 \quad (2)$$

donde: W = contenido de humedad media (kg w/kg m.s.); L = semiespesor del cubo (m); subíndice 0 = estado inicial; subíndice e = estado de equilibrio.

Modelización de las cinéticas de rehidratación

Las cinéticas de rehidratación de los cubos SAC, LPA y LV también fueron modelizadas considerando un modelo difusivo (Ec. 3) y asumiendo las mismas hipótesis que en el caso de la deshidratación (Ec. 2). La única diferencia entre la Ec. 2 y la Ec. 3 es el sentido del flujo de agua.

$$\psi(t) = \frac{W_e - W(t)}{W_e - W_0} = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(\frac{-D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right)} \right]^3 \quad (3)$$

Ajuste del modelo

En la modelización de las cinéticas de secado, la difusividad efectiva se identificó ajustando los modelos difusivos a los datos experimentales. Para ello, se consideró como función objetivo a ser minimizada la suma de la diferencia cuadrática entre los valores experimentales del contenido de humedad media y los calculados con el modelo. En el caso de la modelización de las cinéticas de rehidratación, se identificó simultáneamente la difusividad efectiva y la humedad de equilibrio. En ambos casos, la identificación se llevó a cabo mediante el método de optimización del Gradiente Reducido Generalizado (GRG), disponible en la hoja de cálculo Microsoft Excel™ (Microsoft Corporation, Seattle, USA).

La bondad del ajuste se determinó a partir del porcentaje de varianza explicada (%VAR, Ec. 4) (Berthouex y Brown, 1994).

$$\%VAR = \left[1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \cdot 100 \quad (4)$$

donde: S_{xy} = desviación estándar de la estimación; S_y = desviación estándar de la muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinéticas de secado

Las cinéticas de secado experimentales de los cubos de berenjena realizadas a 50 °C y 2 m/s se muestran en la Figura 2A, mientras que en la Figura 2B se muestran las cinéticas de liofilización a presión atmosférica. Como se puede observar, los tiempos de secado fueron considerablemente más largos en el segundo caso que en las cinéticas de secado por aire caliente. Así, el tiempo que tardan las muestras SAC en alcanzar un contenido de humedad media de 0.5 kg w/kg m.s. estuvo alrededor de las 2 horas. En el caso de las muestras LPA, el tiempo necesario osciló entre 25 y

30 horas. Esta diferencia puede atribuirse a la muy diferente temperatura de secado: 50 ± 1 °C para SAC y -14 ± 1 °C para LPA.

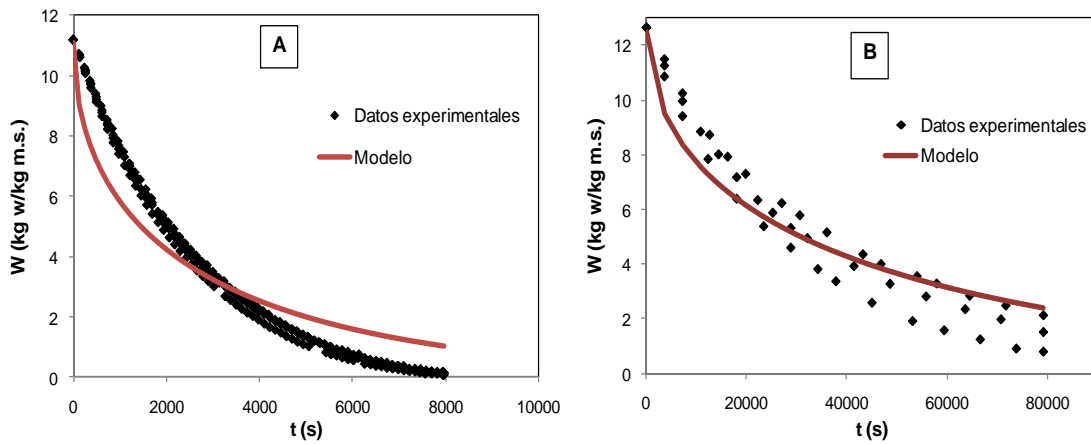


FIGURA 2. Cinéticas de secado con aire caliente (50 °C y 2 m/s, A) y liofilización a presión atmosférica (-14 °C y 2 m/s, B) de berenjena.

Las cinéticas de secado por aire caliente de los cubos de zanahoria se muestran en la Figura 3A. Se aprecia que los tiempos de secado para la zanahoria son más largos que para la berenjena. Esto es debido a las diferencias estructurales entre ambos productos. La berenjena es mucho más porosa y esta estructura más abierta facilita la salida de agua. Según Boukouvalas et al. (2006), la porosidad de la berenjena es de 0.641 frente al valor de 0.137 que presenta la zanahoria. En la Figura 3B se representan las cinéticas de liofilización a presión atmosférica de la zanahoria. Como ocurría en el caso de la berenjena, debido a la baja temperatura utilizada en las experiencias LPA los tiempos de secado fueron mucho mayores que en las SAC. Las muestras LPA necesitaron aproximadamente 160 horas en perder el 80% del peso frente a las 3.5 horas de las SAC.

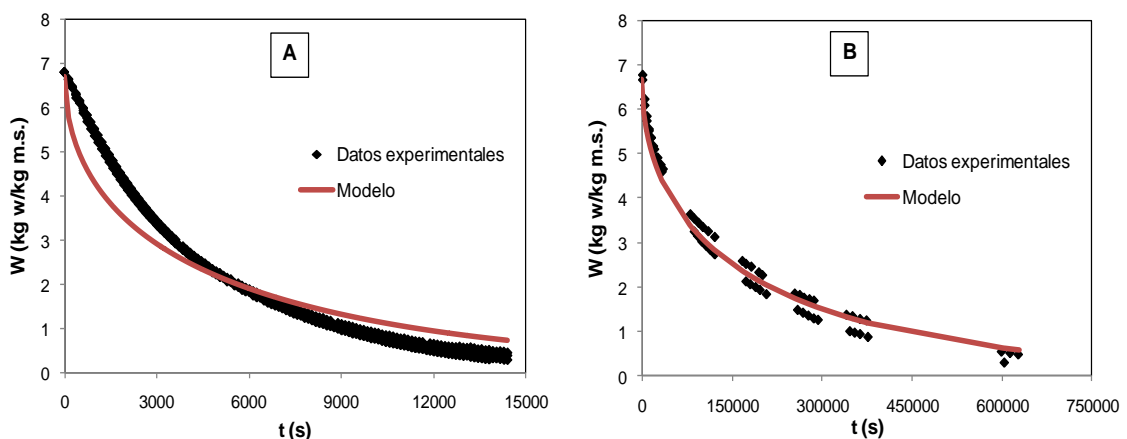


FIGURA 3. Cinéticas de secado con aire caliente (50 °C y 2 m/s, A) y liofilización a presión atmosférica (-14 °C y 2 m/s, B) de zanahoria.

En la Figura 4 se muestran las imágenes de cubos de zanahoria LV, LPA y SAC. Se aprecia que tras el proceso de secado, los cubos SAC

presentaron la estructura más degradada, mostrando un apreciable encogimiento, que queda patente en la deformación de las paredes de los cubos. La estructura de los cubos LV quedó prácticamente igual a la original, mientras que los cubos LPA mantuvieron una apariencia similar a los LV aunque mostraron una ligera deformación de la pared.

Los resultados de la modelización de las cinéticas de secado de berenjena y zanahoria se muestran en la Tabla 1. Como puede observarse, en las experiencias de SAC de berenjena el ajuste resultó pobre ya que el porcentaje de varianza explicada obtenido por el modelo fue de solo el 89.30%. Este bajo valor de la varianza explicada puede ser debido a que las hipótesis consideradas en la formulación del modelo no se correspondieron con las condiciones experimentales. Este hecho se puede apreciar también en la representación de los datos predichos por el modelo junto con los valores experimentales (Figura 2A). Así, se puede observar que la tendencia de ambas series de datos es diferente. En este caso, probablemente la resistencia externa a la transferencia de agua no sea despreciable frente a la interna debido al valor de la velocidad de aire utilizado en el secado (2 m/s) y al encogimiento de la muestra.

El valor de la difusividad efectiva para la LPA de berenjena ($4.56 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) fue prácticamente un orden de magnitud inferior al obtenido para el SAC ($7.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). El porcentaje de varianza explicada obtenido en este caso fue 91.36%, mostrando que el modelo difusivo ajustó ligeramente mejor a los datos experimentales de LPA que a los de SAC.

TABLA 1. Resultados de la modelización de las cinéticas de secado de berenjena y zanahoria.

		$D_e \text{ (m}^2/\text{s)}$	VAR (%)
BERENJENA	SAC	$7.64 \cdot 10^{-10}$	89.30
	LPA	$4.56 \cdot 10^{-11}$	91.36
ZANAHORIA	SAC	$4.13 \cdot 10^{-10}$	91.60
	LPA	$1.07 \cdot 10^{-11}$	98.75

A partir de los datos experimentales se ha visto que los tiempos de SAC fueron mayores para la zanahoria que para la berenjena. Esto coincide con la menor difusividad efectiva identificada para el secado de zanahoria con aire caliente ($4.13 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). En este caso también se obtuvo un porcentaje de varianza explicada relativamente bajo, de 91.60%. Para obtener un mejor ajuste del modelo a los datos experimentales habría que considerar otras hipótesis asumidas en la formulación del modelo, incluyendo la resistencia externa y el encogimiento, que no serían despreciables en este caso.

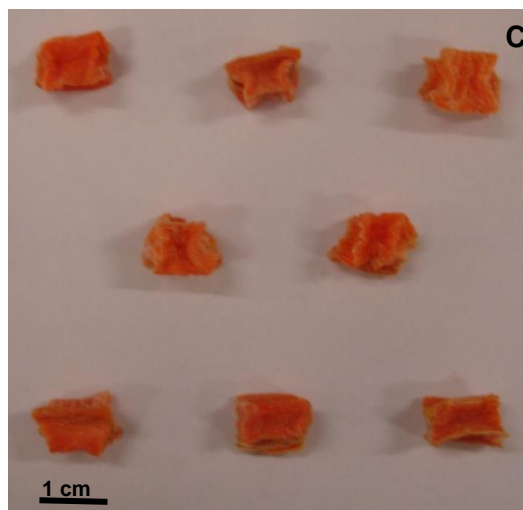
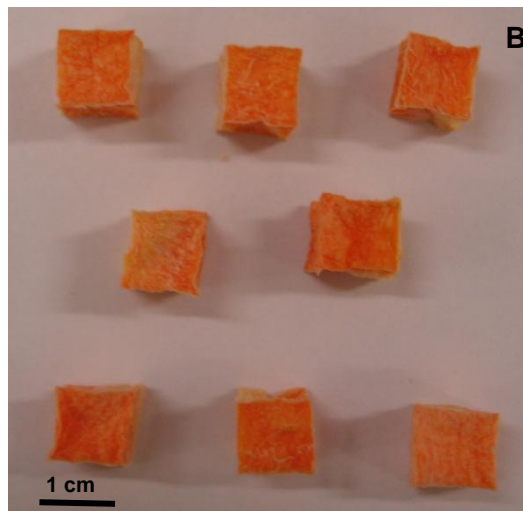
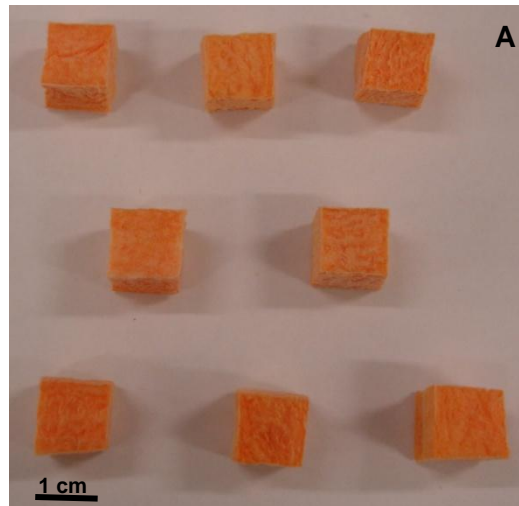


FIGURA 4. Cubos de zanahoria: liofilizados a vacío (A), liofilizados a presión atmosférica (B) y secados con aire caliente (C).

Al igual que en el caso de la berenjena, dado que las experiencias de LPA de zanahoria fueron mucho más largas que las de SAC, se obtuvo un valor de la difusividad efectiva bastante menor para este caso (Tabla 1). Este valor ($1.07 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) también fue considerablemente inferior al obtenido en la LPA de berenjena ($4.56 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), ya que los tiempos de secado fueron bastante más largos en el caso de la zanahoria que en el de la berenjena, del mismo modo que se apreció en el SAC. El elevado valor del porcentaje de varianza explicada obtenido (98.75%) con el ajuste del modelo demuestra que para la LPA de zanahoria la resistencia externa a la transferencia de agua y el encogimiento sí que son despreciables. En estas experiencias, la resistencia interna a la transferencia de agua es elevada debido a la baja temperatura y a la estructura compacta de la zanahoria, por lo que la resistencia externa resulta despreciable frente a la interna. Sin embargo, en el caso de la LPA de berenjena la resistencia interna es menor debido a la elevada porosidad de esta hortaliza, de modo que la resistencia externa no resulta despreciable. Esto explica el bajo porcentaje de varianza explicada obtenido para la LPA de berenjena (91.36%).

Cinéticas de rehidratación

Las cinéticas de rehidratación de los cubos de berenjena LPA y SAC se muestran en la Figura 5, donde se puede observar que las muestras LPA rehidrataron más rápido que las SAC y alcanzaron mayores valores en la humedad final. Las muestras liofilizadas a vacío alcanzaron la humedad de equilibrio prácticamente de manera instantánea (2 segundos) (Figura 5). Esto puede ser debido a la elevada porosidad de las muestras liofilizadas a vacío (Wu et al., 2007). La humedad final alcanzada por las muestras LPA y LV fue similar en ambos casos y próxima a la humedad de la berenjena fresca.

Con respecto a la rehidratación de zanahoria, el comportamiento fue similar al observado en berenjena. Las muestras liofilizadas a vacío fueron las que rehidrataron más rápido y alcanzaron mayores valores de la humedad final (Figura 6). Las muestras LPA mostraron mayor velocidad de rehidratación que las SAC pero alcanzaron valores similares de la humedad final. Las muestras SAC alcanzaron esos valores de humedad manteniéndolas mucho tiempo en rehidratación debido a que recuperaron su estructura lentamente, ya que durante el proceso de secado ésta experimentó una mayor contracción. La menor velocidad de rehidratación de la zanahoria SAC puede ser debida a la mayor degradación (Figura 4) de la estructura durante el secado que produce que el producto resultante sea menos poroso y le cueste más absorber agua cuando se sumerge en ella. En cualquier caso, la humedad final alcanzada por los cubos rehidratados estuvo alejada de la obtenida para la muestra fresca.

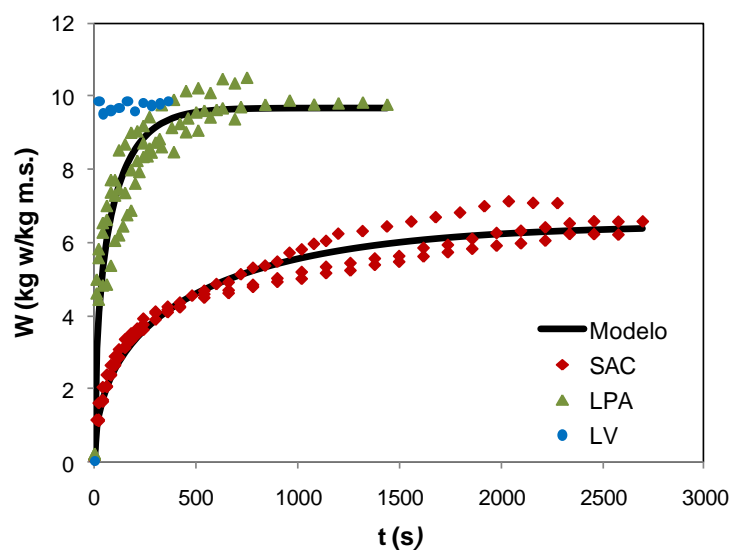


FIGURA 5. Cinéticas de rehidratación (25 °C) de cubos de berenjena deshidratados con aire caliente (SAC), liofilizados a vacío (LV) y liofilizados a presión atmosférica (LPA).

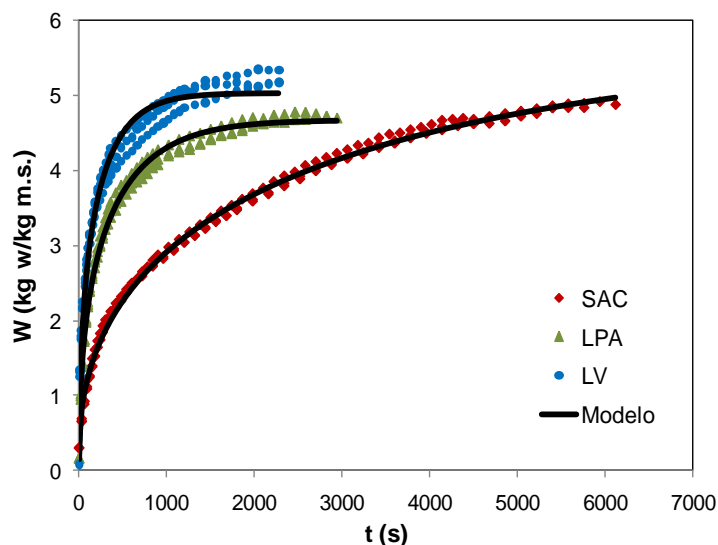


FIGURA 6. Cinéticas de rehidratación (25 °C) de cubos de zanahoria deshidratados con aire caliente (SAC), liofilizados a vacío (LV) y liofilizados a presión atmosférica (LPA).

En cuanto a la apariencia de las muestras rehidratadas, la Figura 7 muestra a modo de ejemplo imágenes de cubos de zanahoria fresca y deshidratada con los 3 métodos (SAC, LPA y LV) tras su rehidratación. En dicha figura se observa que las muestras liofilizadas (LPA y LV) mantuvieron muy bien la estructura durante la rehidratación, quedando muy parecida a la de la muestra fresca. La muestra SAC recuperó también bastante de su aspecto original pero tras la rehidratación se apreciaba todavía una ligera deformación de las paredes del cubo.

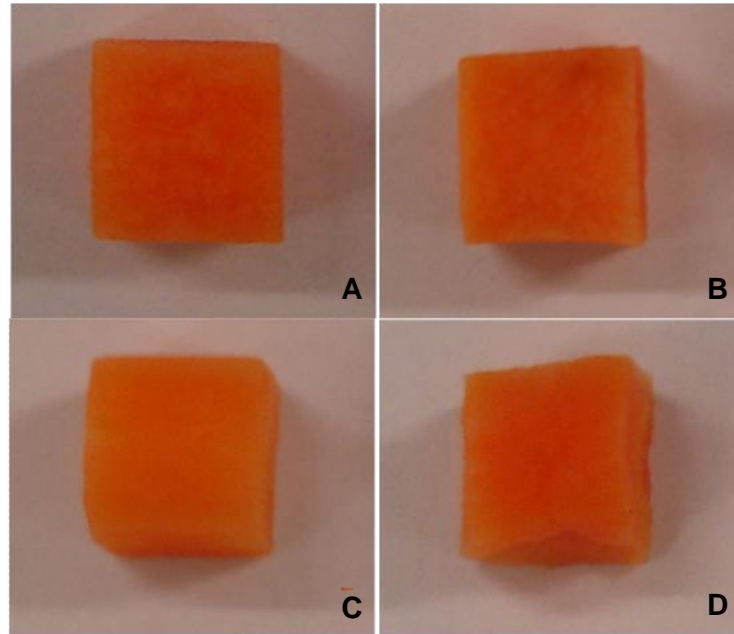


FIGURA 7. Cubos de zanahoria: fresca (A) y liofilizado a vacío (B), liofilizado a presión atmosférica (C) y secado con aire caliente (D) rehidratados.

La Tabla 2 muestra los resultados de la modelización de las cinéticas de rehidratación, es decir la difusividad efectiva y la humedad de equilibrio identificadas y el porcentaje de varianza explicada por dicho modelo. En el caso de la berenjena, el modelo difusivo se ajustó mejor a las cinéticas de rehidratación de las muestras SAC que a las de las LPA. No fue posible ajustar el modelo de rehidratación a las muestras LV ya que, como se ha comentado, su rehidratación fue prácticamente instantánea. Por otro lado, el bajo valor del porcentaje de varianza explicada de las muestras LPA (88.58%) se debió a la dispersión de los datos experimentales pero, como se puede observar en la Figura 5, la tendencia de los datos experimentales y calculados fue similar. Tanto para zanahoria como para berenjena, la difusividad efectiva obtenida para las experiencias de rehidratación de las muestras LPA fue prácticamente un orden de magnitud superior a las de las muestras SAC debido a la elevada porosidad de los cubos LPA. Esta estructura más porosa facilita el movimiento de agua. Por contra, el secado por aire caliente reduce los espacios intercelulares y crea un tejido compacto, perdiendo parcialmente la estructura esponjosa característica de la berenjena y disminuyendo la porosidad (García-Pérez et al., 2010). En las muestras LPA, el encogimiento fue prácticamente despreciable (como se aprecia en la Figura 4) debido a que las experiencias se realizaron a temperaturas por debajo del punto de congelación de las muestras y por eso se produjo un escaso estrés celular en las mismas.

TABLA 2. Resultados de la modelización de las cinéticas de rehidratación de berenjena y zanahoria.

		D_e (m^2/s)	W_{eq} ($kg\ w/kg\ m.s.$)	VAR (%)
BERENJENA	SAC	$4.43 \cdot 10^{-9}$	6.496	96.56
	LPA	$2.56 \cdot 10^{-8}$	9.653	88.58
ZANAHORIA	SAC	$7.84 \cdot 10^{-10}$	5.664	99.72
	LPA	$6.36 \cdot 10^{-9}$	4.670	99.37
	LV	$1.09 \cdot 10^{-8}$	5.019	97.80

En cuanto a los resultados obtenidos en la modelización de las experiencias de rehidratación de zanahoria, destacar que la mayor difusividad fue obtenida por las muestras que habían sido liofilizadas a vacío previamente y la menor por las SAC obteniendo las muestras LPA un valor intermedio. Las diferencias entre ellas fueron cercanas a un orden de magnitud en todos los casos (Tabla 2). Los valores del porcentaje de varianza explicada obtenidos (Tabla 2) fueron mayores que los de berenjena, especialmente en las muestras SAC y LPA donde se superó el 99%, mostrando un buen ajuste a los datos experimentales. En este caso, la repetitibilidad de los datos experimentales fue mayor que en el caso de la berenjena.

Textura

La dureza de las muestras rehidratadas se determinó a partir de los perfiles de esfuerzo/deformación obtenidos de los análisis del perfil de textura de las citadas muestras. En la Figura 8 se representan los valores medios de dureza de los cubos de berenjena rehidratados. El valor obtenido para la muestra fresca (5.7 ± 0.9 N) no se representa en el gráfico porque es prácticamente un orden de magnitud más elevado que el de las muestras rehidratadas. El secado produce una gran degradación de la estructura de la berenjena (García-Pérez et al., 2010), por eso las muestras rehidratadas no recuperan la textura inicial. Independientemente del método de secado utilizado, las muestras rehidratadas quedaron mucho más blandas que la berenjena fresca. También se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la textura de las muestras deshidratadas con los diferentes métodos. Las muestras LV fueron las más blandas y las SAC mostraron el mayor valor de dureza. Las LPA presentaron valores intermedios.

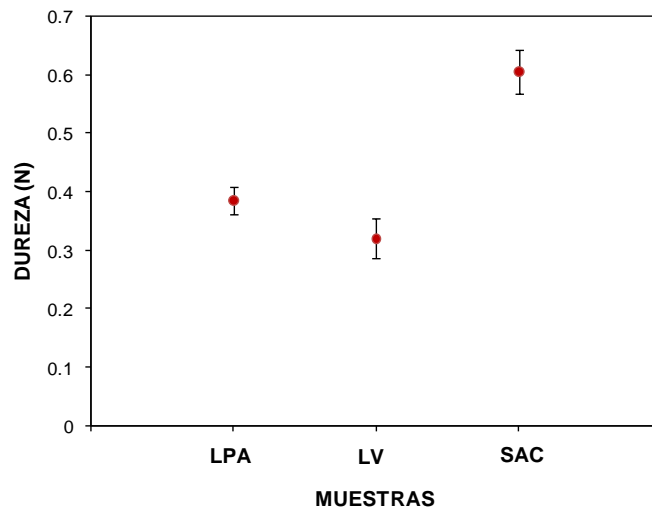


FIGURA 8. Dureza de los cubos de berenjena rehidratados: liofilizados a presión atmosférica (LPA), liofilizados a vacío (LV) y secados con aire caliente (SAC). Valores medios e intervalos LSD.

En la textura de la zanahoria se observó algo similar a lo ocurrido en la berenjena. Los cubos de zanahoria SAC rehidratados presentaron la mayor dureza (Figura 9). Las muestras más blandas fueron las liofilizadas a vacío y las LPA mostraron unos valores de dureza intermedios. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la dureza de todas las muestras (rehidratadas y fresca). Para cualquiera de los métodos de secado utilizados, los valores de dureza de las muestras rehidratadas estuvieron muy alejados del obtenido para la muestra fresca (100.1 ± 5.9 N). Esto es debido a la degradación de la estructura que produce el secado, que hace que las muestras queden mucho más blandas tras ser rehidratadas.

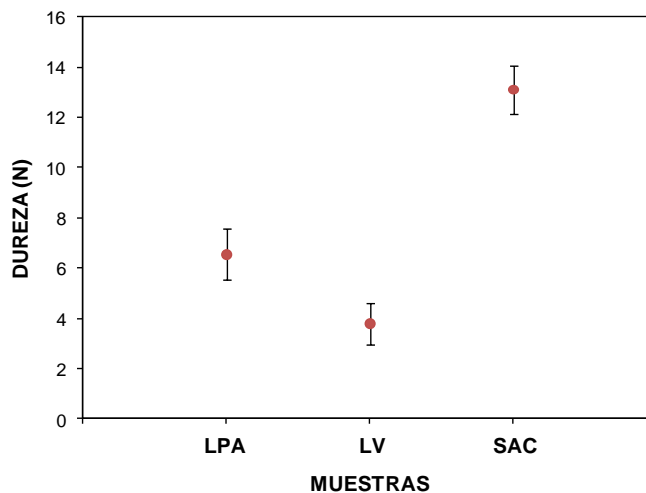


FIGURA 9. Dureza de los cubos de zanahoria rehidratados: liofilizados a presión atmosférica (LPA), liofilizados a vacío (LV) y secados con aire caliente (SAC). Valores medios e intervalos LSD.

CONCLUSIONES

- Las cinéticas de SAC fueron mucho más rápidas que las de LPA tanto en berenjena como en zanahoria. Esto se puede atribuir a la diferencia de temperatura de secado (50 °C en SAC frente a -14 °C en LPA).
- Los tiempos de secado fueron más largos para la zanahoria que para la berenjena tanto en SAC como en LPA. Esto puede ser debido a la diferencia en la estructura de ambas hortalizas, ya que la berenjena es más porosa y pierde agua con mayor facilidad.
- El modelo difusivo ajustó bien a los datos experimentales en las cinéticas de LPA de zanahoria, en las que se cumplieron las hipótesis asumidas en la formulación, es decir, encogimiento y resistencia externa a la transferencia de agua despreciables.
- Los valores de difusividad efectiva identificados en berenjena y zanahoria fueron mayores en SAC que en LPA. Asimismo, la difusividad efectiva fue mayor en berenjena que en zanahoria tanto en SAC como en LPA.
- La velocidad de rehidratación de las muestras de berenjena y zanahoria y el contenido de humedad de equilibrio se vieron afectados por el método de secado. Las muestras LPA mostraron una velocidad de rehidratación intermedia entre las muestras SAC y LV.
- El método de secado produjo cambios en las propiedades texturales de berenjena y zanahoria. Las muestras LPA mostraron una dureza intermedia entre las muestras SAC y LV.
- Por tanto, la liofilización a presión atmosférica puede representar una alternativa interesante al secado con aire caliente y a la liofilización a vacío, obteniendo productos deshidratados de elevada calidad con un menor coste que en el caso de la liofilización a vacío. Su aplicación a nivel industrial requeriría un estudio profundo de la influencia de las diferentes variables en las cinéticas del proceso de secado y en la calidad final del producto deshidratado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos mis compañeros del grupo ASPA su apoyo durante la realización de este trabajo.

A mis directores José Vicente García y Juan Cárcel por todos sus consejos y por su paciencia y dedicación.

A mi familia por todo su apoyo continuo, constante e incondicional.

Al MICINN por su financiación para la realización de este trabajo a través del proyecto DPI2009-14549-C04-04.

REFERENCIAS

- Akpınar, E.K.; Bicer, Y. 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science and Technology*, 40: 273-281.
- Alves-Filho, O.; Eikevik, T.; Mulet, A.; Garau, C.; Rosselló, C. 2007. Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. *Drying Technology*, 25 (7-9): 1155-1161.
- AOAC, Official methods of analysis (Association of Official Analytical Chemist, Arlington, Virginia, USA, 1997).
- Askari, G.R.; Emam-Djomeh, Z.; Mousavi, S.M. 2009. An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air/microwave assisted dehydration. *Drying Technology*, 27: 831-841.
- Berthouex, P.M.; Brown, L.C. 1994. Statistics for environmental engineers. Lewis Publishers Inc., New York, USA.
- Boukouvalas, Ch.J.; Krokida, M.K.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. 2006. Density and porosity: literature data compilation for foodstuffs. *International Journal of Food Properties*, 9 (4): 715-746.
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion; Oxford University Press, London.
- Ertekin, C.; Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
- García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Riera, E.; Mulet, A. 2009. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, 27: 281-287.
- García-Pérez, J.V.; Puig, A.; Pérez-Munuera, I.; Cárcel, J.A.; Riera, E. 2010. Kinetic and microstructural changes induced by power ultrasound application on convective drying of eggplant. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, 23-27.
- Hassini, L.; Azzouz, S.; Peczkalski, R.; Belghith, A. 2007. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correlation of shrinkage, *Journal of Food Engineering*, 79: 47-56.
- Lin, T.M.; Durance, T.D.; Scaman, C.H. 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31 (2): 111-117.
- Mayor, L.; Sereno, A.M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61: 373-386.
- Mulet, A.; Cárcel, J.A.; Sanjuán, N.; García-Pérez, J.V. 2010. Food dehydration under forced convection conditions. En: Recent Progress in Chemical Engineering, J. Delgado (ed), Studium Press LLC, Houston, TX, USA.
- Ortuño, C.; García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Femenía, A.; Mulet, A. 2010. Modelling of ultrasonically assisted convective drying of eggplant, 17th International Drying symposium, Magdeburg, Germany, 3-6 October 2010.
- Ratti, C. 2001. Hot air and freeze drying of high value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49: 311-319.
- Suvarnakuta, P.; Devahastin, S.; Tagawa, A. 2007. Drying kinetics and β -carotene degradation in carrot undergoing different drying processes. *Journal of Food Science*, 70 (8): 520-526.
- Wu, L.; Orikasa, T.; Ogawa, Y.; Tagawa, A. 2007. Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering*, 83: 422-429.