

CINÉTICA DEL PROCESO DE SECADO DE SEMILLAS DE ZAPALLO Y MELÓN DE DESCARTE PARA OBTENER SNACKS

M. Celia Román^{1,3}, Mathias A. Riveros¹, M. Paula Fabani^{2,3} Rosa Rodríguez¹,

¹Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNSJ.

²Instituto de Biotecnología, Facultad de Ingeniería, UNSJ.

³CONICET.

Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 CPA: J5400ARL - San Juan - Argentina

mcroman@unsj.edu.ar

Introducción

El zapallo y el melón son frutos ampliamente consumidos en Argentina, siendo San Juan una de las provincias que produce gran cantidad de estas cucurbitáceas. En relación a sus cultivos, se observa una pérdida del 20-30% en la producción, ya que al momento de la cosecha se recolectan solo los frutos que cumplen con los estándares de calidad para su posterior comercialización, determinados por su tamaño, presencia de manchas y grado de madurez entre otros, mientras que los frutos que no satisfacen esos estándares se desaprovechan. Esto aparece como consecuencia una reducción en la rentabilidad del proceso productivo. Por lo general, en el caso de nuestra provincia, sólo se comercializan en su estado natural (en fresco) sin someterlo a procesos tecnológicos.

A nivel nacional e internacional, se utiliza la deshidratación como un medio de conservación para alimentos, ya que permite la reducción de peso y volumen, prolongar su vida útil y al mismo tiempo no alterar su sabor característico ni sus propiedades nutricionales. En tal sentido, los alimentos tipo snack dulces o salados pueden resultar como una alternativa interesante en la búsqueda de diferentes productos con alto valor agregado que hoy integran el mercado internacional; los cuales se obtienen con distintas tecnologías de secado.

Sobre la base de lo expuesto, en la presente propuesta se plantea utilizar esta tecnología (deshidratado) para obtener semillas de zapallo y melón, que posteriormente pueden ser consumidas solas (tipo snack), como parte de una colación junto con frutos secos (en bolsitas individuales), en ensaladas, o como ingrediente en preparaciones más elaboradas (panificados). Las semillas de zapallo y melón presentan una composición rica en sustancias potencialmente benéficas para la salud. La semilla de zapallo se

valora desde un punto de vista nutricional, por su alto contenido de proteínas y contenido de ácido linoleico [1], mientras que las semillas de melón contienen alto porcentaje de lípidos y proteínas, además de otros compuestos bioactivos [2].

Con el propósito de optimizar el proceso de deshidratación, en este trabajo se estudió la cinética del secado a 50, 60 y 70 °C, en semillas de zapallo (*Cucurbita Moschata*) variedad "Cokena Inta" y de melón (*Cucumis Melo L.*) variedad "Sundew" de descarte, para elaborar un producto tipo snack con valor agregado

Materiales y Métodos

Muestras. Se colectaron en el Departamento de Iglesia (provincia de San Juan), de manera aleatoria de las pilas de zapallo (*Cucumis moschata* var "Coquena INTA") y melón (*Cucumis Melo L.* var "Sundew") de descarte, que fueron cosechados por los agricultores de la Cooperativa. Todas las muestras se almacenaron a 4 °C en la oscuridad, hasta su análisis dentro de los 2-4 días posteriores al muestreo.

Procesamiento de las muestras. Los zapallos y melones se lavaron, se partieron a la mitad y se les extrajeron las semillas.

La humedad inicial de las semillas se determinó según Norma AOAC [3] a 105°C hasta lograr peso constante.

Equipo de secado y procedimiento experimental. El equipo que se utilizó es un analizador de humedad marca RADWAG PMR 50 NH con una fuente de energía halógena que provee rápido calor infrarrojo.

Durante la experiencia de secado, se trabajó a tres temperaturas diferentes: 50, 60 y 70 °C. Para cada experimento se obtuvieron los datos de la pérdida de humedad durante el proceso de secado cada 30 segundos, hasta alcanzar peso constante. Los ensayos de secado para cada temperatura se realizaron por triplicado y se

informa la pérdida de peso promedio. Los valores de contenido de humedad, para las diferentes temperaturas y tiempos de secado ensayados, se convirtieron en la relación de humedad adimensional MR , como se muestra en la Ec. (1).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M_t es el contenido de humedad en base seca en cualquier momento t , M_e es el contenido de humedad de equilibrio y M_0 el contenido de humedad inicial, todos expresados en base seca (g de agua / g de sólidos secos). Posteriormente, se utilizaron 4 modelos matemáticos de capa fina semiempíricos, para representar la cinética de secado experimental de las semillas de zapallo y melón. La Tabla 1, muestra las expresiones de los modelos seleccionados; siendo a , b , c y n constantes empíricas, k la constante de velocidad de secado, y t el tiempo de secado.

Tabla 1. Modelos matemáticos aplicados a la curvas de secado

Ec.	Nombre	Modelo	Ref
(2)	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[4]
(3)	Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[5]
(4)	Logaritmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	[6]
(5)	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[7]

Cálculo de Difusividad Efectiva y Energía de Activación. Para el cálculo del coeficiente de difusividad efectiva, se utilizó la solución analítica de la segunda ecuación de Fick, la cual resulta adecuada para fenómenos difusivos durante la transferencia de masa en el alimento durante el secado hasta alcanzar el equilibrio [8]. Asumiendo que las semillas se asemejan a una lámina infinita, que la transferencia de masa es unidimensional y los tiempos de secado son largos, la expresión matemática del modelo se puede escribir como indica la Ec. (6):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2} \right) \quad (6)$$

Donde D_{eff} es el coeficiente de difusividad efectiva (m^2/s^2) y L es el semiespesor de la capa a secar (m). La difusividad efectiva de la humedad se puede deducir a través de la linealización de la

Ec. (6), graficando los datos experimentales de $\ln(MR)$ versus tiempo, a través de la pendiente. En general, la influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva del agua en los alimentos sigue una tendencia tipo Arrhenius, según Ec. (7).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Donde D_0 es el factor de Arrhenius, R es la constante universal de los gases ($kJ/kmol K$) y T es la temperatura absoluta (K). Al representar el $\ln D_{eff}$ vs $1/T$ se obtiene una línea recta de cuya pendiente se obtiene la E_a y de la ordenada al origen se obtiene el factor de Arrhenius (D_0).

Análisis Estadístico

Para evaluar el ajuste de los modelos matemáticos con los datos experimentales, se utilizaron los siguientes coeficientes estadísticos: CHI-cuadrado (X^2), suma de los errores al cuadrado (SSE) y raíz cuadrada de los errores al cuadrado ($RMSE$). Los mejores ajusten serán de aquellos modelos que presenten los valores más bajos de X^2 , SSE y $RMSE$ [9] y los valores más altos de R^2 . Las expresiones matemáticas de estos parámetros estadísticos mencionados son las siguientes:

$$SSE = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left((MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left((MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)} \quad (9)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left((MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)}{N \cdot z} \quad (10)$$

Donde $MR_{exp,i}$ representan la relación de humedad obtenida experimentalmente, $MR_{pre,i}$ son las predicciones hechas por los modelos matemáticos, N es el número de datos y z el número de constantes. El ajuste y los cálculos estadísticos se realizaron con el programa Solver de Microsoft Excel 2010.

Resultados y Discusión

Características del Secado por Infrarrojo a Diferentes Temperaturas. La humedad inicial de la materia prima fue de $39,8 \pm 0,6$ y $44,7 \pm 0,8$ % para las semillas de zapallo y melón,

respectivamente. La Figura 1 (A) y (B), muestra las curvas experimentales de secado de las semillas a las tres temperaturas estudiadas. Como se observa en la misma, la proporción de humedad disminuyó exponencialmente con el tiempo y al aumentar la temperatura de calentamiento, el tiempo de secado es más corto y la velocidad de secado es mayor.

En el caso de las semillas de zapallo, se observa un comportamiento similar en la cinética de secado para las temperaturas de 60 y 70 °C, alcanzando un MR < 0.2 después de los 40 minutos. Sin embargo, no se observa lo mismo para las semillas de melón, las cuales presentan curvas de secado similares entre las tres temperaturas estudiadas, alcanzando en un tiempo menor la humedad final (20-22 minutos). Considerando que las semillas deben tener una humedad menor al 10%, en el caso del zapallo, esta humedad es alcanzada a los 71, 37 y 25 minutos para 50, 60 y 70°C, respectivamente. En el caso del melón, esta humedad se logra a los 35, 27 y 19 minutos para 50, 60 y 70°C, respectivamente.

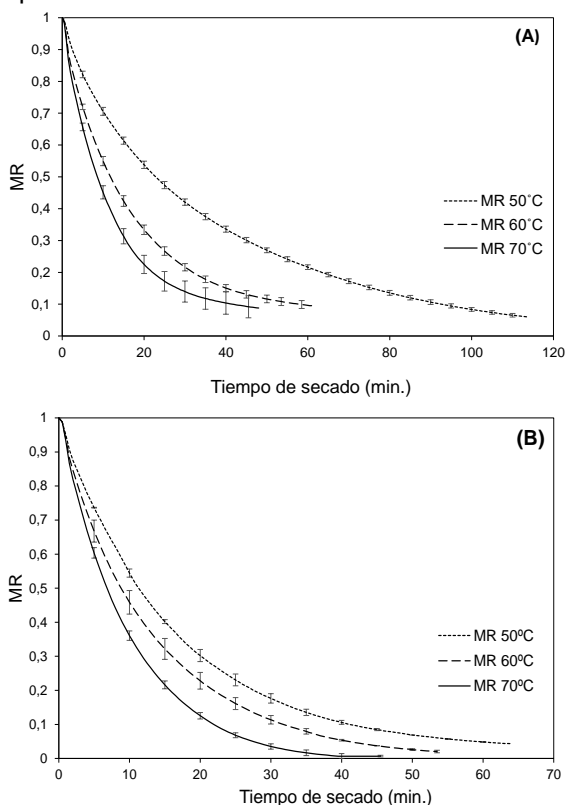


Figura 1. Curvas experimentales de secado para (A): Semillas de Zapallo y (B): Semillas de Melón.

En la Figura 2 se observan las variaciones de la velocidad de secado con el contenido de

humedad de las muestras de semillas a las temperaturas de secado de 50, 60 y 70°C. Se advierte que la velocidad de secado decrece a medida que disminuye el contenido de humedad. En la etapa donde MR presenta una relación lineal con el tiempo (Figura 1), la velocidad de secado alcanza su valor máximo y, posteriormente, el producto se seca con velocidad decreciente. Los valores máximos de la velocidad de secado, son siempre mayores cuando la temperatura de secado es mayor. La evaporación del agua inicialmente tiene lugar en la superficie de las semillas, pero ésta pierde relevancia con el transcurso del proceso. La difusión de la humedad interior de la semilla a la superficie, progresivamente llega a ser un factor significativo, disminuyendo la velocidad de secado (Figura 1 y 2).

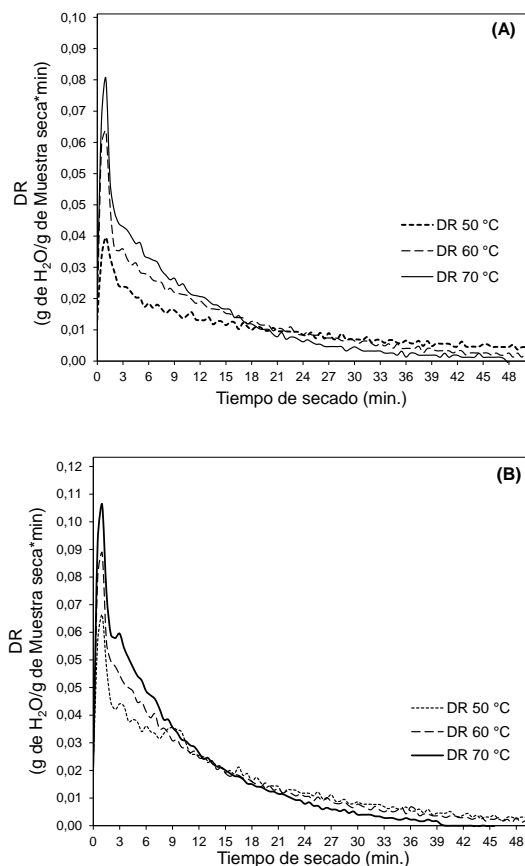


Figura 2. Velocidad de secado de (A): Semillas de Zapallo y (B): Semillas de Melón.

Modelado Matemático de la Cinética de Secado. En la Tabla 2, se muestran los valores de los parámetros obtenidos para cada modelo aplicado a los datos obtenidos. Basándose en el análisis estadístico, los datos experimentales tuvieron un

buen ajuste en los cuatro modelos probados. Sin embargo, el modelo de Midilli fue el que mejor representó las curvas de secado experimentales para las tres temperaturas estudiadas y para ambas semillas, al obtener los valores más bajos de las variables estadísticas calculadas y los R^2 más altos (Tabla 3). Por lo tanto, se recomienda utilizar este modelo para predecir la variación de MR en el tiempo, durante el secado de semillas de zapallo y melón, por calor infrarrojo, entre 50-70 °C.

Por otra parte, al analizar los valores de los parámetros de ajuste del modelo de Midilli (Tabla 2, Ec. 5), se pudo observar que la constante k , correspondiente al valor exponencial decreciente, depende de la temperatura, ya que mientras más alta sea ésta, su valor aumenta. Este efecto ha sido observado en trabajos previos de secado de diversas frutas [10, 11].

Tabla 2. Parámetros de ajustes de los modelos.

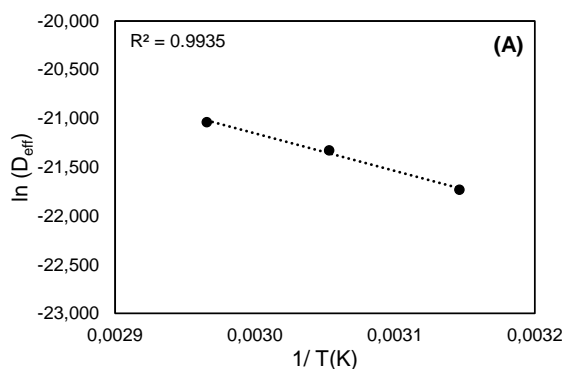
Ec.	ZAPALLO			MELÓN			
	Temperatura de secado en °C						
	50	60	70	50	60	70	
2	k	0,027	0,073	0,073	0,058	0,075	0,103
3	k	0,025	0,044	0,067	0,061	0,069	0,080
	n	1,081	1,185	1,078	0,967	1,097	1,283
4	a	0,906	0,894	0,918	0,973	0,979	1,026
	k	0,028	0,064	0,091	0,063	0,076	0,102
	c	0,036	0,081	0,079	0,028	0,009	-0,010
5	k	0,059	0,082	0,099	0,066	0,097	0,102
	n	0,786	0,885	0,934	0,972	0,913	1,003
	a	1,017	1,008	1,012	1,007	1,019	1,016
	b	-2,6E ⁻⁴	8,1E ⁻⁴	1,4E ⁻³	3,4E ⁻⁴	-1,5E ⁻⁴	-2,3E ⁻⁴

Tabla 3. Análisis Estadístico de los modelos.

Ec.	ZAPALLO			MELÓN			
	Temperatura de secado en °C						
	50	60	70	50	60	70	
2	X ²	7,4E ⁻⁴	7,6E ⁻³	1,2E ⁻³	1,5E ⁻⁴	8,3E ⁻⁵	7,6E ⁻⁵
	SSE	7,4E ⁻⁴	7,6E ⁻³	1,2E ⁻³	1,5E ⁻⁴	8,2E ⁻⁵	7,5E ⁻⁵
	RMSE	2,7E ⁻²	8,7E ⁻²	3,5E ⁻²	1,2E ⁻²	9,1E ⁻³	8,7E ⁻³
	R ²	0,997	0,997	0,992	0,999	0,999	0,999
3	X ²	7,4E ⁻⁴	1,2E ⁻³	1,2E ⁻³	1,5E ⁻⁴	8,4E ⁻⁵	7,7E ⁻⁵
	SSE	7,4E ⁻⁴	1,2E ⁻³	1,2E ⁻³	1,5E ⁻⁴	8,2E ⁻⁵	7,5E ⁻⁵
	RMSE	2,7E ⁻²	3,5E ⁻²	3,5E ⁻²	1,2E ⁻²	9,1E ⁻³	8,7E ⁻³
	R ²	0,997	0,994	0,992	0,999	0,999	0,999
4	X ²	1,4E ⁻⁴	4,1E ⁻⁵	2,4E ⁻⁵	8,8E ⁻⁶	4,7E ⁻⁵	1,9E ⁻⁵
	SSE	1,4E ⁻⁴	3,9E ⁻⁵	1,9E ⁻⁵	8,6E ⁻⁶	4,6E ⁻⁵	1,9E ⁻⁵

	RMSE	1,2E ⁻²	6,3E ⁻³	4,4E ⁻³	2,9E ⁻³	6,9E ⁻³	4,3E ⁻³
	R ²	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
5	X ²	3,8E ⁻⁶	1,0E ⁻⁵	1,8E ⁻⁵	8,6E ⁻⁶	1,1E ⁻⁵	2,1E ⁻⁵
	SSE	3,7E ⁻⁶	9,8E ⁻⁶	1,7E ⁻⁵	8,3E ⁻⁶	1,0E ⁻⁵	1,9E ⁻⁵
	RMSE	1,9E ⁻³	3,1E ⁻³	4,1E ⁻³	2,9E ⁻³	3,2E ⁻³	4,5E ⁻³
	R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

Determinación del Coeficiente de Difusividad Efectiva y Energía de Activación. De la aplicación del modelo de difusión de Fick se obtuvieron los valores de la D_{eff} del agua para cada una de las temperaturas estudiadas. Para las semillas de zapallo fue de: 3,65E⁻¹⁰, 5,48E⁻¹⁰ y 7,30E⁻¹⁰ m²/s y para las semillas de melón 3,24E⁻¹⁰; 4,86E⁻¹⁰ y 8,11E⁻¹⁰ m²/s a 50, 60 y 70°C, respectivamente. Estos valores de D_{eff} pertenecen al rango de 10⁻¹² y 10⁻⁸ m²/s correspondientes a alimentos o sistemas alimentarios [12] y son comparables con los valores hallados para el secado asistido por infrarrojo de otros alimentos [13, 14]. Cabe destacar que, a valores mayores del coeficiente de difusividad, mayor es la velocidad de secado, y por lo tanto el tiempo del proceso es menor. Mientras que la dependencia con la temperatura se describe a partir de una relación tipo Arrhenius. En la Figura 3, se representa $\ln(D_{eff})$ en función de $1/T$ (K), donde a partir de la pendiente de la línea recta se obtiene la relación Ea/R . La energía de activación, para las semillas de zapallo fue de 31,9 KJ/mol y para las semillas de melón de 42,1 KJ/mol. El valor encontrado para las semillas de zapallo es comparable con el valor reportado por Sacilik [15] de 33,15 KJ/mol para semillas sin cascarón. Además, este autor menciona que para varios alimentos el rango de valores de este parámetro es entre 15 y 40 KJ/mol [15]. Es importante considerar que a menores valores de energía de activación, menor será la energía que se deba proporcionar a las semillas para llevar a cabo su deshidratación.



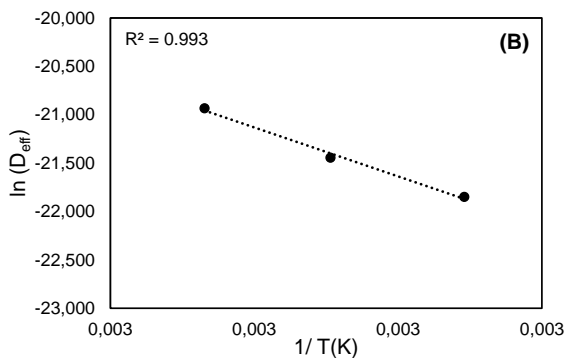


Figura 3. Representación gráfica de la ecuación de Arrhenius para (A): Semillas de Zapallo, (B): Semillas de Melón.

Conclusiones

Se estudió la cinética de secado para evaluar el efecto de tres temperaturas (50, 60 y 70 °C) en el secado de semillas de zapallo y melón, para elaborar un producto tipo snack. El Modelo de Midilli fue el que presentó el mejor ajuste para describir las curvas de secado experimentales, para las tres temperaturas estudiadas.

Los valores de los coeficientes de D_{eff} del agua obtenidos para las semillas de estudiadas, son comparables con los valores ya reportados para otros alimentos. Por otra parte, la energía de activación para las semillas de zapallo fue menor que para las de melón, lo que indica que un menor requerimiento de energía es necesario para llevar a cabo el proceso de secado. Al considerar los resultados obtenidos hasta el momento, las temperaturas más adecuadas de deshidratado serían 60 y 70 °C, para ambas semillas, debido a que es más corto el tiempo de secado para obtener el producto deseado (snack). A su vez, cabe destacar que las semillas de melón alcanzan en menor tiempo una humedad inferior al 10%. Es importante señalar que para establecer una temperatura óptima de secado deben realizarse otros análisis sobre las semillas, como es período de conservación y propiedades nutricionales para su empleo como snack o ingrediente en preparaciones alimentarias.

Referencias

[1] Glew R. H. et al. (2006). *Amino acid, mineral and fatty acid content of pumpkin seeds (Cucurbita spp) and Cyperus esculentus nuts in the Republic of Niger*. Plant Foods Human Nutrition, Volume 61 (2) 51–56.
[2] Mehra M.; Pasricha V.; Gupta R.K. (2015). *Estimation of nutritional, phytochemical and antioxidant*

activity of seeds of musk melon (Cucumis melo) and wáter melon (Citrullus lanatus) and nutritional analysis of their respective oils. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, Volume 3 (6) 98-102.

[3] AOAC (1990). *Official method of analysis*, Association of official analytical chemists. Arlington, USA.

[4] Liu Q.; Bakker-Arkema, F.W. (1997). *Stochastic modelling of grain drying. Part 2: model development*. Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 66 (4) 275–280.

[5] White G.M.; Ross I.J.; Poneleit C.G. (1981). *Fully exposed drying of popcorn*. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers, Volume 24 (2) 466–468.

[6] Yagcioglu A.; Degirmencioglu A.; Cagatay, F. (1999). *Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions*. In Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy. Adana, Turkey, 565–569.

[7] Midilli A.; Kucuk H.; Yapar Z. (2002). *A new model for single layer drying*. Dry Technology, Volume 20 (7) 1503–1513.

[8] Senadeera W.; Bhandari B.R.; Young G.; Wijesinghe B. (2003). *Influence of Shapes of Selected Vegetable Materials on Drying Kinetics during Fluidized Bed Drying*. Journal of Food Engineering, Volume 58 (3) 277–283.

[9] Vega Gálvez A.; Andrés A.; Gonzalez E.; Notte Cuelloc E.; Chacanaa M.; Lemus Mondacaa R. (2009). *Mathematical Modelling on the Drying Process of Yellow Squat Lobster (Cervimunida Jhoni) Fishery Waste for Animal Feed*. Animal Feed Science Technology, Volume 151 (3-4) 268–279.

[10] Nowak D.; Lewicki P. (2004). *Infrared drying of Apple slices*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, Volume 5 (3) 353-360.

[11] Togrul H. (2006). *Suitable drying model for infrared drying of carrot*. Journal of Food Engineering, Volume 77 (3) 610–619.

[12] Motevali A.; Minaei S.; Khoshtaghaza M.H.; Amirnejat H. (2011). *Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices*. Energy, Volume 36 (11) 6433-6441.

[13] Puente Diaz L.; Ah-Hen, K.; Vega Galvez A.; Lemus Mondaca L.; Di Scala K. (2013). *Combined Infrared-Convective Drying of Murta (Ugni molinae Turcz) Berries: Kinetic Modelling and Quality Assessment*. Drying Technology, Volume 31 (3) 329–338.

[14] Doymaz I. (2012). *Infrared drying of sweet potato (Ipomoea batatas L.) slices*. Food Science Technology, Volume 49 (6) 760-766.

[15] Sacilik K. (2007). *Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.)*. Journal of Food Engineering, Volume 79 (1) 23–30.