

DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CASTAÑA EN MEDIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS DE SAL, SACAROSA Y GLUCOSA OSMOTIC DEHYDRATION OF CHESTNUT USING STATIC AND DYNAMIC MEDIA OF SALT, SUCROSE AND GLUCOSE

F. Chenlo , R. Moreira , M. D. Torres & J. Ferra

To cite this article: F. Chenlo , R. Moreira , M. D. Torres & J. Ferra (2008) DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CASTAÑA EN MEDIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS DE SAL, SACAROSA Y GLUCOSA OSMOTIC DEHYDRATION OF CHESTNUT USING STATIC AND DYNAMIC MEDIA OF SALT, SUCROSE AND GLUCOSE, CYTA - Journal of Food, 6:2, 117-129, DOI: [10.1080/11358120809487636](https://doi.org/10.1080/11358120809487636)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/11358120809487636>



Copyright Taylor and Francis Group, LLC



Published online: 02 Oct 2009.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 484



View related articles [↗](#)



Citing articles: 1 View citing articles [↗](#)

DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CASTAÑA EN MEDIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS DE SAL, SACAROSA Y GLUCOSA

OSMOTIC DEHYDRATION OF CHESTNUT USING STATIC AND DYNAMIC MEDIA OF SALT, SUCROSE AND GLUCOSE

Chenlo, F.*; Moreira, R.; Torres, M. D.; Ferra, J.

Departamento de Enxeñaría Química. Escola Técnica Superior de Enxeñaría. Universidade de Santiago de Compostela. Rúa Lope Gómez de Marzoa, s/n 15782. Santiago de Compostela, España.

Recibido/Received 26-02-2008; aceptado/accepted 16-07-2008

*Autor para la correspondencia/Corresponding author. E-mail: francisco.chenlo@usc.es

Abstract

Chestnut fruits were submitted to osmotic dehydration in sodium chloride (17, 22, 26.5 % w/w), sucrose (40, 50, 60 % w/w) and glucose (40, 50, 56.5 % w/w) solutions at different stirring rates (0, 40, 110 rpm) and periods of time (1, 2, 4, 8 h) at 20 °C. The effect of temperature (50 °C) was studied in the case of samples dehydrated with glucose solutions. Several parameters for each dehydration process such as solids gain, water loss, and its corresponding ratio and weight reduction, were determined. High stirring rates increased solids gain and decreased water loss and its ratio, especially in the case of solutions of high viscosity. Moisture and solids gain contents were modelled by Hawkes and Flink equation for short times and water and osmotic solute transfer coefficients were calculated. The corresponding effective coefficients of diffusion were also evaluated by means of Fick's law.

Resumen

Se estudió la deshidratación osmótica de la castaña en disoluciones acuosas de sal (17, 22, 26,5 % p/p), sacarosa (40, 50, 60 % p/p) y glucosa (40, 50, 56,5 % p/p) a diferentes grados de agitación (0, 40, 110 rpm) y tiempos (1, 2, 4, 8 h) a 20 °C. En las disoluciones de glucosa se estudió el efecto de la temperatura (50 °C). Se determinaron los parámetros cinéticos de ganancia de sólidos, pérdida de agua, reducción de peso y relación pérdida de agua-ganancia de sólidos. Al aumentar la agitación, aumentó la ganancia de sólidos, la pérdida de agua y disminuyó la relación entre ambos, especialmente cuando las disoluciones tuvieron elevada viscosidad. Las cinéticas de los contenidos de humedad y de sólidos se modelizaron mediante la ecuación de Hawkes y Flink para tiempos cortos. Se determinaron los coeficientes de transferencia para el agua y el soluto osmótico y los coeficientes de difusividad mediante la ley de Fick.

Keywords: stirring effect, osmotic dehydration, kinetic parameters, mass transfer coefficients

Palabras clave: agitación, deshidratación osmótica, parámetros cinéticos, coeficientes de transferencia de materia

INTRODUCCIÓN

La castaña es un fruto tradicional de los países de Asia, Sur de Europa y Norte de Africa que se recolecta durante el período septiembre-noviembre. Las especies más comunes son la *Castanea sativa* en Europa, *Castanea mollissima* y *Castanea creanata* en Asia y la *Castanea dentata* en el Norte de América (Bergougnoux *et al.*, 1978; Breisch H, 1996; De la Montaña *et al.*, 2004). La producción mundial suma la cifra de 500.000 ton/año siendo los principales productores (en ton), Corea (119.790), China (117.000), Italia (78.432), Turquía (70.000), Bolivia (32.233), Japón (26.200), España (20.000; 3 % de la producción mundial), Portugal (19.728), Rusia (14.000) y Francia (12.745), (FAO, 2006, *Inventory*

of chestnut research, <http://www.fao.org/docrep/006/ad235e00.htm>).

Cada año existe un mayor consumo de castaña en la industria alimentaria para la producción de *marrón glacé*, harinas, cremas, purés, etc, (Cavarna, 1992). No obstante, dada su producción estacional, la fabricación de productos a partir de castañas está limitada a una determinada época del año. Para satisfacer la demanda del consumidor es necesaria la aplicación de tratamientos que permitan prolongar su vida útil.

Los métodos convencionales empleados para la conservación de la castaña son la congelación y el secado. La congelación presenta las desventajas relativas a los costos energéticos, transporte y almacenamiento, además, la castaña congelada pierde sabor, textura y color. El secado

es el método más utilizado, pero su costo también es elevado debido a la necesidad de aire caliente; en cambio, ofrece las ventajas de la reducción de peso y volumen y, en consecuencia, los costos de transporte y almacenamiento. Por otra parte, al eliminar el agua del alimento, las reacciones enzimáticas disminuyen (menor actividad de agua) no necesitando envases especiales para su conservación.

La deshidratación osmótica en disoluciones hipertónicas de determinados agentes en alta concentración puede constituir un método alternativo para la conservación de la castaña. El contenido de humedad del alimento es parcialmente eliminado, consiguiéndose mantener la calidad del producto por la reducción de la actividad de agua. Al sumergir un alimento en medios hipertónicos se produce un transporte de agua del alimento hacia el medio osmótico y, en contracorriente, de soluto hacia el seno del alimento, lo que puede resultar interesante y atribuirle un valor añadido. Así, se logra una mejor conservación manteniendo por más tiempo las propiedades físicas y organolépticas (Jayaraman y Das Gupta, 1992; Raoult-Wack, 1994; Sacchetti *et al.*, 2004). Además, en la deshidratación por ósmosis, al no consumir prácticamente energía, se disminuyen los costos y la degradación del producto al evitar altas temperaturas (Chenlo *et al.*, 2006a; 2006b). En contrapartida, el proceso osmótico es relativamente lento, por lo que analizar el efecto de diferentes variables sobre la velocidad de los procesos de transferencia de materia es un aspecto importante. De este modo, es común el análisis de la temperatura, nivel de agitación, concentración y viscosidad del medio osmótico, tamaño y geometría del alimento, aplicación de vacío, entre otras variables, con el fin de optimizar la etapa de deshidratación (Rastogi *et al.*, 2002; Giraldo *et al.*, 2003). En general, se admite que un método combinado que incluye la deshidratación osmótica como pretratamiento, seguida de un secado por convección con aire caliente, es una buena alternativa desde el punto de vista de la calidad del producto final, del ahorro energético y de la economía del proceso (Karanthanos *et al.*, 1995).

En este trabajo se profundiza en el estudio de la deshidratación osmótica de la castaña ampliando el estado del conocimiento alcanzado en trabajos anteriores en diferentes medios acuosos de sal (Chenlo *et al.*, 2006a), sacarosa (Chenlo *et al.*, 2007), glucosa (Chenlo *et al.*, 2006b) a diferentes concentraciones y temperaturas en medios estáticos. El objetivo principal es analizar y cuantificar la influencia que la agitación del medio puede ejercer sobre la velocidad del proceso osmótico, al facilitar el transporte del agua hacia el exterior del alimento y/o evitando que el soluto del medio osmótico se deposite en la superficie de la castaña. Esto supondrá la reducción del tiempo de contacto muestra-medio y de los costos de operación a nivel industrial (Rastogi *et al.*, 2002). No obstante, resultados previos de otros autores son contradictorios ya que se han aportado resultados

indicando que en el caso de la deshidratación osmótica de la manzana (Moreira y Sereno, 2003) y del tomate (Tonon *et al.*, 2007) se produce, en ambos casos, un aumento de la velocidad de transferencia de agua sin modificar la velocidad de adquisición de los solutos osmóticos empleados (cloruro sódico y sacarosa), mientras que otros autores (Panagiotou *et al.*, 1999) empleando manzana, banana y kiwi obtuvieron que la velocidad de transferencia de soluto osmótico (sacarosa) fue dependiente del nivel de agitación y la del agua se mostró invariable; por último, la agitación fue favorable al proceso de eliminación de agua en geles, sin alterar la adquisición de cloruro sódico y decreciendo la adquisición de sacarosa cuando se emplearon disoluciones ternarias de ambos solutos (Bohuon *et al.*, 1998). De este modo, es necesario llevar a cabo la deshidratación osmótica de castaña en disoluciones acuosas de sal, sacarosa y glucosa a diferentes concentraciones, tiempos de contacto y niveles de agitación del medio osmótico con el fin de determinar experimentalmente el efecto de la agitación en la velocidad del proceso. En el caso de las disoluciones de glucosa también se realizó un análisis del efecto de la temperatura. La comparación respecto a los resultados obtenidos en los sistemas en estático, así como la modelización a través de ecuaciones existentes en la bibliografía, son, asimismo, objetivos del trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron castañas (*Castanea sativa* M.) de la variedad *Longal* recolectadas en los meses octubre-diciembre de 2006 y adquiridas en un mercado local en la Comunidad Autónoma de Galicia (España). Las castañas tenían una humedad inicial de (55 ± 2) % (base húmeda). Posteriormente fueron sometidas a una selección por tamaño (se trabajó con muestras de 10-12 g/unidad) y envasado a vacío, almacenándose en cámara fría (3 °C) hasta el momento de su utilización (con periodos máximos de dos meses) como muestras en los ensayos de deshidratación osmótica.

Las disoluciones empleadas en la deshidratación osmótica fueron preparadas usando sal de mesa (cloruro sódico, 98 % de pureza mínima), azúcar comercial (sacarosa, 98 % de pureza mínima) y glucosa anhidra (Merck, 99 % de pureza mínima). Las concentraciones de las disoluciones fueron 17, 22 y 26,5 % p/p para la sal, 40, 50 y 60% p/p para la sacarosa y 40, 50 y 56,5 % p/p para la glucosa (las concentraciones más altas corresponden a valores próximos a la saturación a 20 °C).

Las muestras de ensayo estaban constituidas por castañas enteras peladas (sin tegumento) y cortadas (después de sacarles el tegumento se les eliminó la superficie rugosa mediante un raspado superficial). Después de pesarlas (balanza analítica Mettler AJ 150, precisión $\pm 0,0001$ g) fueron introducidas en frascos de

vidrio con tapa, con un volumen de 500 mL, que contenían los diferentes medios hipertónicos. Las disoluciones fueron sometidas a agitaciones de 0, 40 y 110 rpm (agitador orbital con plataforma Selecta Rotaterm). Al cabo de los tiempos de ensayo programados (1, 2, 4 y 8 h) las castañas fueron extraídas, se les retiró el exceso de disolución osmótica adherida a la superficie externa utilizando un papel absorbente y fueron nuevamente pesadas en la balanza analítica antes de ser introducidas en una estufa a vacío (Heraeus Vacutherm VT 6025) a 70 °C y presión menor de 100 mmHg para determinar su base seca (AOAC, 1995). La temperatura de trabajo fue 20 °C, a excepción de los ensayos con disolución de glucosa (20 y 50 °C). En todos los casos la relación disolución/muestra se mantuvo por encima del factor 10 para garantizar que el cambio de concentración del medio osmótico pueda ser considerado despreciable. Se ensayaron 4 muestras para cada tiempo de operación y para cada nivel de agitación, concentración de soluto y temperatura. Los resultados obtenidos fueron promediados.

Las cinéticas del proceso osmótico se evaluaron mediante la determinación de los parámetros cinéticos siguientes: ganancia de sólidos, *SG*; pérdida de agua, *WL*; pérdida de peso, *WR*; contenido normalizado de humedad, *NMC*; contenido normalizado de sólidos, *NSC* y la relación (pérdida de agua)-(ganancia de sólidos), *WL/SG*, para cada conjunto de condiciones de operación (tiempos, solutos y concentraciones de las disoluciones) de acuerdo con las expresiones (1)-(5) (Lerici *et al.*, 1985):

$$WR = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (1)$$

$$SG = \frac{m - m_0}{M_0} \quad (2)$$

$$WL = WR + SG \quad (3)$$

$$NMC = \frac{1 - m/M}{1 - m_0/M_0} = \frac{X}{X_0} \quad (4)$$

$$NSC = \frac{m}{M_0(1 - X_0)} \quad (5)$$

en donde *M* representa la masa total de la muestra, *m* la masa de sólidos en la muestra, *X* el contenido de humedad y el subíndice cero hace referencia a las condiciones iniciales del proceso de deshidratación osmótica.

La determinación de los parámetros *NMC* y *NSC* permite obtener, mediante la aplicación del modelo propuesto por Hawkes y Flink (1978), los coeficientes de transferencia de materia para el agua, k_w , y para los sólidos,

k_s . Este modelo muestra una dependencia no lineal entre los parámetros *NMC* y *NSC* y el tiempo de deshidratación osmótica:

$$NMC = 1 - k_w t^{0.5} \quad (6)$$

$$NSC = 1 + k_s t^{0.5} \quad (7)$$

donde *t* es el tiempo de deshidratación osmótica.

Dado que los procesos de transferencia de materia involucrados en la deshidratación osmótica son en estado no estacionario y, asumiendo que el mecanismo controlante es difusional (en el interior de la castaña), una solución simplificada de la ley de Fick aplicada a tiempos cortos, tomando un solo término de la solución del desarrollo en serie, puede ser obtenida bajo determinadas condiciones (concentración inicial de componente uniforme en el interior de la muestra, coeficiente de difusión constante y muestra isotrópica) (Telis *et al.*, 2004). Relacionando las ecuaciones (6) y (7) con la segunda ley de Fick, aplicada a una geometría esférica (Crank, 1975), puede establecerse una relación entre los coeficientes de transferencia de materia y el coeficiente de difusión efectivo:

$$k_w = 2 \left(\frac{D_{eff}}{\rho d_{eq}^2} \right)^{0.5} \quad (8)$$

en donde D_{eff} representa la difusividad efectiva del agua o del soluto osmótico y d_{eq} el diámetro equivalente de la muestra calculado mediante:

$$V = \frac{1}{6} \rho d_{eq}^3 \quad (9)$$

siendo *V* es el volumen de la castaña (determinado por desplazamiento volumétrico en heptano líquido).

La consideración generalizada de que toda la resistencia al transporte de materia está en la fase sólida se puede aceptar tan solo bajo determinadas condiciones que, en el caso de la operación de deshidratación osmótica es dudosa cuando se emplean disoluciones acuosas concentradas con elevada viscosidad (disoluciones de azúcar). En estas condiciones, el coeficiente de difusión calculado mediante los modelos anteriores ha de considerarse como un coeficiente efectivo puesto que se determina a partir de la intensidad de flujo de materia observada bajo la consideración de la existencia de únicamente un gradiente en el interior de la muestra. Si la resistencia a la transferencia en la fase líquida es despreciable, estos coeficientes han de ser los mismos independientemente de las características hidrodinámicas de la fase líquida. De este modo, en el caso de que se mantengan constantes todas las propiedades excepto las condiciones reológicas, la respuesta constante del coeficiente de transferencia de materia es indicativa de la

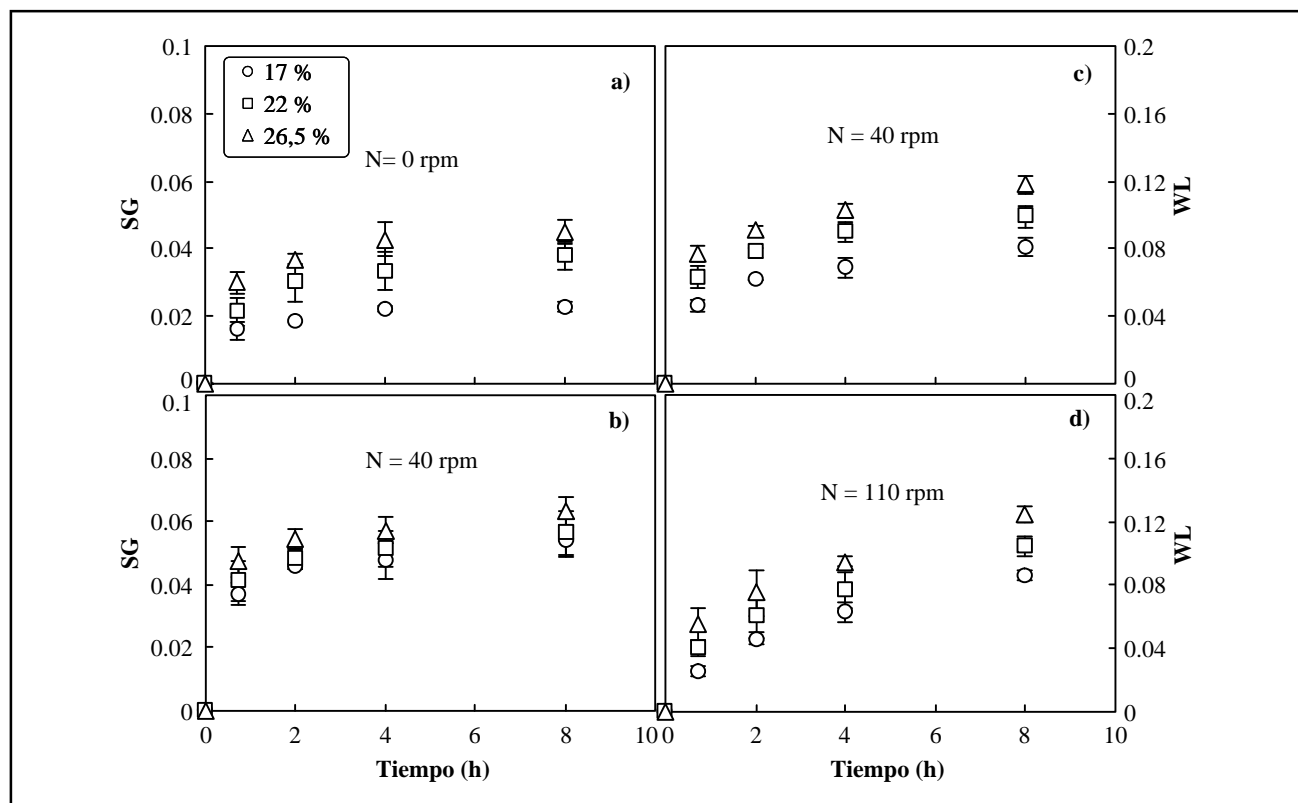


Figura 1. Parámetros cinéticos de ganancia de sólidos (*SG*) y pérdida de agua (*WL*) de la deshidratación de castaña en disoluciones de sal a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C.

Figure 1. Kinetic parameters of solids gain (*SG*) and water loss (*WL*) for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of salt solutions at 20 °C.

ausencia de una resistencia significativa al transporte de materia en la fase líquida. Por lo tanto, en el caso de que la fase líquida se encuentre con alta agitación (régimen turbulento) se determinará únicamente un coeficiente de difusión efectiva, propiamente dicho, en la fase sólida.

Así, la transferencia de materia en la deshidratación osmótica encuentra dos resistencias al transporte de soluto osmótico hacia el interior de la castaña: resistencia a la transferencia que ofrece la capa de masa que se forma en la superficie externa de la castaña y la resistencia que ofrece el tejido celular en el interior de la castaña. La difusividad efectiva viene dada por una expresión que encierra la suma de dos resistencias en serie.

$$D_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{ext}} \times d_{\text{eq}}} + \frac{1}{D_s}} \quad (10)$$

en donde k_{ext} es el coeficiente de transferencia de materia externo y D_s es el coeficiente de difusión en el interior del sólido.

Para el caso de que no exista gradiente de concentración en la superficie externa de la castaña, la resistencia externa es nula y el valor de k_{ext} es infinito. Entonces:

$$D_{\text{eff}} = D_s \quad (11)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Ósmosis con disoluciones de sal

La aplicación de las ecuaciones (2) y (3) a los datos experimentales permiten calcular los parámetros correspondientes a la ganancia de sólidos (*SG*) y a la pérdida de agua (*WL*) cuyos valores se presentan en la Figura 1 para alguno de los sistemas tomados como ejemplo de las concentraciones de cloruro sódico (17, 22 y 26,5 % p/p) y velocidades de agitación (0, 40 y 110 rpm) a 20 °C. En todos los casos existe una significativa transferencia de materia en los momentos iniciales que se mantiene creciente con el tiempo del proceso, si bien con menor intensidad. Para un tiempo de contacto y nivel de agitación determinados, tanto la ganancia de sólidos como la pérdida de agua, aumentan con la concentración del medio osmótico. Por su parte, la velocidad de agitación del medio, en sistemas de igual concentración, provoca una mayor transferencia de materia (40 rpm) respecto al sistema estático, siendo el efecto menos creciente a mayores agitaciones (110 rpm). Los valores finales de *SG*

Tabla 1. Parámetros cinéticos de ganancia de sólidos (*SG*), pérdida de agua (*WL*) y relación *WL/SG*, correspondientes al tiempo máximo ensayado (8 h) en la deshidratación con sal (17, 22 y 26,5 % p/p), sacarosa (40, 50 y 60 % p/p) y glucosa (40, 50 y 56,5 % p/p), velocidades de agitación del medio (0, 40 y 110 rpm) a 20 y 50 °C.

Table 1. Kinetic parameters of solids gain (*SG*), water loss (*WL*), and *WL/SG* ratio corresponding to the maximum period of time tested (8h) during dehydration using salt (17, 22 and 26.5 % w/w), sucrose (40, 50 and 60 % w/w) and glucose (40, 50 and 56.5 % w/w), at several stirring rates (0, 40 and 110 rpm) and at 20 and 50 °C.

	Velocidad de agitación (rpm)	Concentración (% p/p)		
		17	22	26,5
Sal, 20 °C				
SG (kg/kg)	0	0,023 ± 0,002	0,038 ± 0,004	0,045 ± 0,003
	40	0,054 ± 0,005	0,056 ± 0,006	0,063 ± 0,005
	110	0,052 ± 0,005	0,060 ± 0,003	0,068 ± 0,006
WL (kg/kg)	0	0,042 ± 0,006	0,083 ± 0,003	0,097 ± 0,003
	40	0,080 ± 0,003	0,099 ± 0,004	0,120 ± 0,004
	110	0,086 ± 0,003	0,104 ± 0,005	0,124 ± 0,005
WL/SG	0	1,86 ± 0,29	2,19 ± 0,21	2,15 ± 0,16
	40	1,50 ± 0,16	1,76 ± 0,22	1,87 ± 0,16
	110	1,64 ± 0,19	1,73 ± 0,14	1,83 ± 0,21
Sacarosa, 20 °C				
SG (kg/kg)	0	0,020 ± 0,001	0,032 ± 0,003	0,040 ± 0,001
	40	0,029 ± 0,004	0,044 ± 0,002	0,060 ± 0,003
	110	0,058 ± 0,004	0,061 ± 0,003	0,066 ± 0,001
WL (kg/kg)	0	0,050 ± 0,005	0,075 ± 0,006	0,102 ± 0,001
	40	0,062 ± 0,004	0,093 ± 0,009	0,125 ± 0,009
	110	0,091 ± 0,004	0,119 ± 0,007	0,149 ± 0,010
WL/SG	0	2,49 ± 0,30	2,33 ± 0,30	2,58 ± 0,06
	40	2,16 ± 0,33	2,15 ± 0,29	2,11 ± 0,20
	110	1,56 ± 0,15	1,96 ± 0,16	2,26 ± 0,17
Glucosa, 20 °C				
SG (kg/kg)	0	0,030 ± 0,005	0,043 ± 0,004	0,049 ± 0,004
	40	0,048 ± 0,006	0,054 ± 0,005	0,059 ± 0,004
	110	0,069 ± 0,007	0,072 ± 0,005	0,075 ± 0,004
WL (kg/kg)	0	0,057 ± 0,003	0,091 ± 0,004	0,119 ± 0,006
	40	0,091 ± 0,007	0,116 ± 0,004	0,134 ± 0,005
	110	0,115 ± 0,006	0,141 ± 0,010	0,150 ± 0,010
WL/SG	0	1,92 ± 0,34	2,09 ± 0,24	2,45 ± 0,23
	40	1,91 ± 0,32	2,16 ± 0,23	2,29 ± 0,19
	110	1,68 ± 0,19	1,94 ± 0,19	2,00 ± 0,19
Glucosa, 50 °C				
SG (kg/kg)	110	0,061 ± 0,005	0,074 ± 0,012	0,083 ± 0,002
WL (kg/kg)	110	0,137 ± 0,013	0,161 ± 0,006	0,191 ± 0,007
WL/SG	110	2,25 ± 0,30	2,19 ± 0,32	2,31 ± 0,10

y *WL* (mayores tiempos de contacto) permiten calcular la relación (pérdida de agua)-(ganancia de sólidos), *WL/SG* (Tabla 1). Se observa que este parámetro aumenta con la concentración, resultados concordantes con la bibliografía (Chenlo *et al.*, 2006a) y tiende a decrecer con la velocidad de agitación a la que se somete el medio osmótico, indicando, por tanto, que en las condiciones hidrodinámicas ensayadas se favorece más la transferencia de adquisición de cloruro sódico hacia el alimento. En estudios de deshidratación osmótica de la castaña con disoluciones acuosas de glicerol se encontró que este cociente fue prácticamente constante cuando se emplearon disoluciones más concentradas y disminuyó en el caso de disoluciones más diluidas respecto al nivel de agitación (Moreira *et al.*, 2007).

La aplicación de las ecuaciones (4) y (5) y el conocimiento del contenido de humedad de las muestras, permite calcular el contenido de humedad normalizado (*NMC*) y el contenido de sólidos normalizado (*NSC*) (Figura 2). En las figuras a) y b) se puede constatar que el contenido de humedad disminuye en función del tiempo, fundamentalmente durante las primeras h del proceso y que, en todo el intervalo de la deshidratación, su valor es menor para velocidades de agitación mayores (110 rpm). Por tanto, la velocidad de agitación del medio osmótico favorece la eliminación del agua del alimento. En la figuras c) y d) se puede observar que el contenido de sólidos aumenta con el tiempo, especialmente durante las primeras 4 h de deshidratación; posteriormente este aumento es más moderado, una vez que se aproxima al equilibrio.

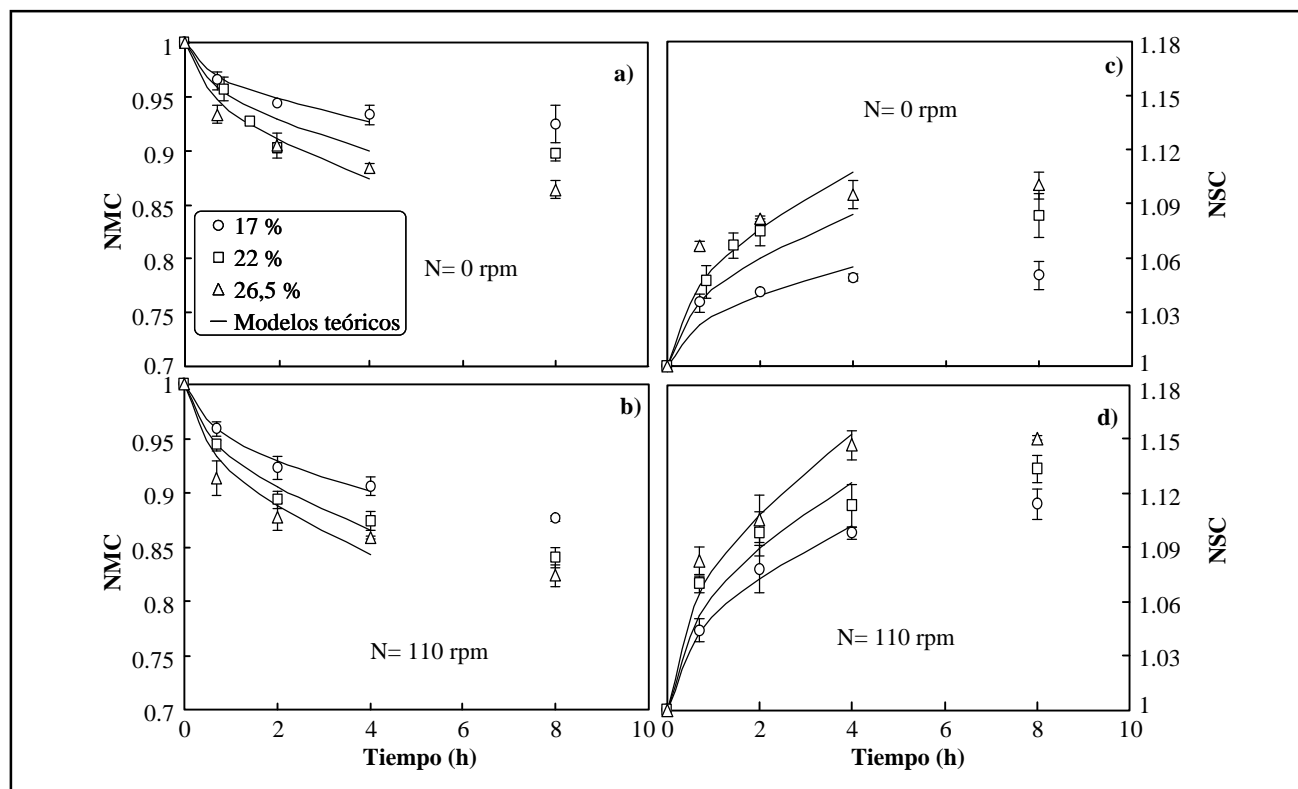


Figura 2. Parámetros cinéticos de contenido normalizado de humedad (*NMC*) y de sólidos (*NSC*) de la deshidratación de castaña en disoluciones de sal a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C. Líneas corresponden a las ecs. (6 y 7).

Figure 2. Kinetic parameters of normalised moisture (*NMC*) and solids (*NSC*) content for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of salt solutions at 20 °C. Lines correspond to eqs. (6 and 7).

En la Tabla 2 se presentan los valores de los coeficientes de transferencia correspondientes al modelo propuesto por Hawkes y Flink (1978) determinados por análisis de regresión, donde en ambos casos aumentaron con la concentración y el grado de agitación de la disolución osmótica. En la Figura 2 se observa el satisfactorio ajuste de los valores experimentales de *NSC* y *NMC* para los primeros momentos del proceso osmótico, correspondiente al período de mayor transferencia de componente (primeras 4 h). El 90% de los datos se desvían en menos del 4 %. A través de las ecuaciones (8) y (9) se calculan los valores del coeficiente de difusividad efectiva, D_{eff} y consecuentemente, los de la difusividad de agua en el sólido, D_s , para velocidades de agitación de 110 rpm (Tabla 2). Para esta velocidad de agitación se propone que toman valores iguales, lo que quiere decir que toda la resistencia a la transferencia de masa está dentro de la muestra sólida. Un análisis de estos valores permite concluir que un aumento de la concentración del medio hace que el coeficiente de difusividad efectiva aumente.

Seguidamente, con los valores de la difusividad del agua en el sólido, y a través de la ecuación [10], se calculan los coeficientes de transferencia de masa externo (k_{ext}) para las diferentes concentraciones del medio osmótico y

velocidades de agitación de 0 y 40 rpm. Los valores de estos coeficientes son más altos cuanto más altas son la concentración y la velocidad de agitación de la disolución y están de acuerdo con la bibliografía (Tonon *et al.*, 2007).

Osmosis con disoluciones de sacarosa

En la Figura 3 se presentan los valores obtenidos para los parámetros *SG* y *WL* en la deshidratación con disoluciones de sacarosa para algunos casos correspondientes a diferentes concentraciones (40, 50 y 60 % p/p) y velocidades de agitación del medio osmótico (0, 40 y 110 rpm) a 20 °C. Al igual que para la sal, se observa una significativa transferencia de materia en los primeros momentos, que después crece lentamente, en forma asintótica, con el tiempo de proceso, consecuencia de la disminución de la fuerza impulsora, hasta alcanzar un estado próximo al equilibrio. Este comportamiento es seguido para todas las concentraciones y velocidades de agitación ensayadas. La agitación del medio osmótico influye cuantitativamente en los parámetros *SG* y *WL*, haciendo que sus valores aumenten con la velocidad de agitación. Los valores correspondientes al sistema en condiciones estáticas están de acuerdo con valores reportados previamente (Chenlo *et al.*, 2007). Se observa

Tabla 2. Coeficientes de la ecuación de Hawkes-Flink para el agua (k_w) y el soluto (k_s), coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y de difusividad del agua en el sólido (D_s) y coeficientes de transferencia de masa externo (k_{ext}), correspondientes al tiempo máximo ensayado (8 h) en la deshidratación con sal (17, 22 y 26,5 % p/p), sacarosa (40, 50 y 60 % p/p) y glucosa (40, 50 y 56,5 % p/p), velocidades de agitación del agua medio (0, 40 y 110 rpm) a 20 °C.

Table 2. Coefficients of Hawkes-Flink equation for water (k_w) and solute (k_s), effective diffusivities (D_{eff}) and diffusivity of water inside solid (D_s), and external mass transfer coefficients (k_{ext}), corresponding to the maximum period of time tested (8 h) during dehydration using salt (17, 22, and 26.5 % w/w), sucrose (40, 50, and 60 % w/w) and glucose (40, 50, and 56.5 % w/w), at several stirring rates (0, 40, and 110 rpm) at 20 °C.

	Velocidad de agitación (rpm)		Concentración (% p/p)				
Medio osmótico: Sal							
k_w (h ^{-0.5})		17	R^2	22	R^2	26,5	R^2
	0	0,036	0,98	0,050	0,99	0,063	0,97
	40	0,046	0,98	0,063	0,98	0,078	0,97
k_s (h ^{-0.5})	110	0,050	0,98	0,067	0,97	0,079	0,96
	0	0,028	0,95	0,042	0,95	0,054	0,97
	40	0,046	0,96	0,056	0,95	0,070	0,96
D_{eff} (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	0,051	0,97	0,063	0,95	0,077	0,96
	0	1,64		3,06		4,68	
	40	1,49		2,87		5,64	
D_s (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	3,04		5,55		7,29	
	110	3,04		5,55		7,29	
k_{ext} (10 ⁻⁸ m/s)	0	1,49		2,87		5,64	
	40	7,18		17,43		74,96	
Medio osmótico: Sacarosa							
k_w (h ^{-0.5})		40		50		60	
	0	0,022	0,98	0,050	0,97	0,070	0,98
	40	0,037	0,98	0,055	0,98	0,076	0,99
k_s (h ^{-0.5})	110	0,058	0,97	0,076	0,97	0,082	0,99
	0	0,018	0,98	0,034	0,97	0,046	0,95
	40	0,039	0,99	0,047	0,95	0,063	0,96
D_{eff} (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	0,062	0,97	0,066	0,94	0,072	0,96
	0	0,570		3,14		5,89	
	40	1,78		3,96		7,86	
D_s (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	4,48		6,31		8,88	
	110	4,48		6,31		8,88	
k_{ext} (10 ⁻⁸ m/s)	0	0,280		2,62		7,41	
	40	1,20		4,31		27,41	
Medio osmótico: Glucosa							
k_w (h ^{-0.5})		40		50		56,5	
	0	0,037	0,99	0,061	0,98	0,069	0,98
	40	0,045	0,98	0,062	0,97	0,072	0,99
k_s (h ^{-0.5})	110	0,073	0,96	0,085	0,96	0,093	0,98
	0	0,032	0,98	0,040	0,98	0,048	0,98
	40	0,037	0,95	0,043	0,97	0,057	0,96
D_{eff} (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	0,055	0,93	0,057	0,93	0,062	0,93
	0	1,94		5,19		6,92	
	40	2,95		5,39		7,30	
D_s (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	110	7,63		10,04		12,30	
	110	7,63		10,04		12,30	
k_{ext} (10 ⁻⁸ m/s)	0	1,02		4,40		6,24	
	40	1,87		4,59		7,08	

un importante aumento del parámetro SG cuando se trabaja en sistemas con agitación, alcanzando valores un 65 % mayores cuando se pasa de 0 a 110 rpm. Lo mismo sucede con WL , que aumenta cerca de un 42 % al someter el medio a agitación. Con los valores de SG y WL se calcularon los valores del parámetro WL/SG (Tabla 1). Este parámetro aumenta a medida que lo hace la concentración del soluto osmótico para los sistemas a 110 rpm y permanece prácticamente constante en el resto de los casos. Por otra parte, se observa un decrecimiento de dicho parámetro con la velocidad de agitación.

Como en el caso de la ósmosis con sal, se calculan los parámetros NMC y NSC (Figura 4). Se observa una disminución del contenido de humedad durante el tiempo de deshidratación, siendo esta disminución más acentuada hasta las 4 h del tratamiento y más moderado una vez que se va aproximando al equilibrio. Por su parte, el contenido de sólidos tiene un comportamiento inverso, es decir, aumenta con el transcurso del tiempo.

Los valores de los parámetros NMC y NSC se modelizaron (Ecs (6) y (7)) hasta las 4 h de deshidratación, ya que después de transcurrido este tiempo el sistema se

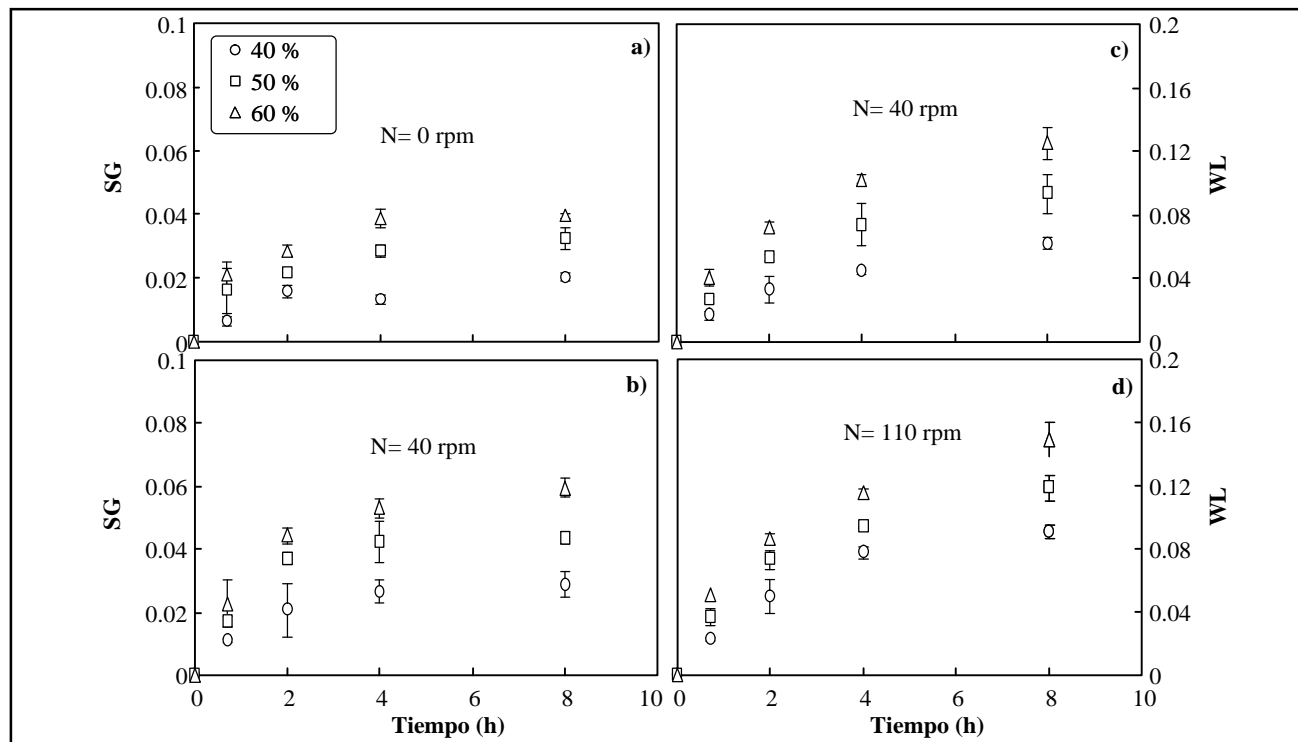


Figura 3. Parámetros cinéticos de ganancia de sólidos (SG) y pérdida de agua (WL) de la deshidratación de castaña en disoluciones de sacarosa a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C.

Figure 3. Kinetic parameters of solids gain (SG) and water loss (WL) for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of sucrose solutions at 20 °C.

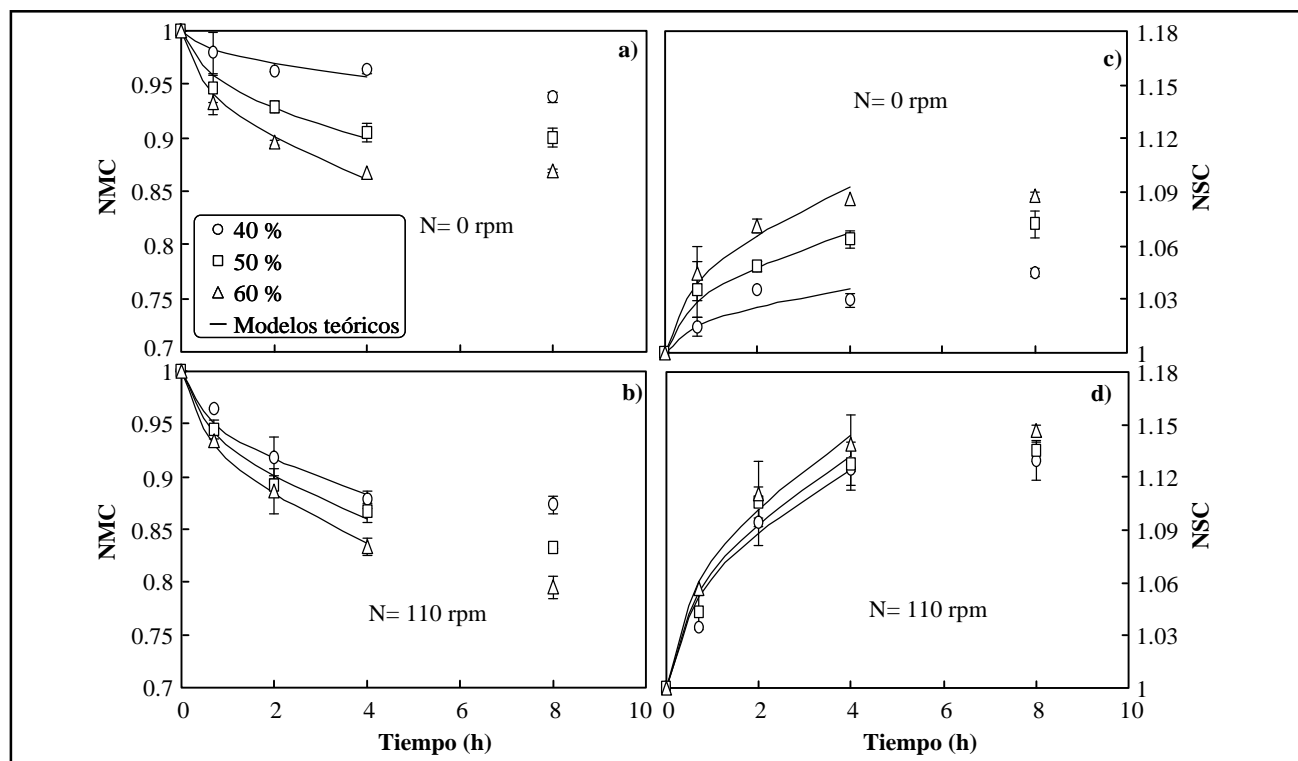


Figura 4. Parámetros cinéticos de contenido normalizado de humedad (NMC) y de sólidos (NSC) de la deshidratación de castaña en disoluciones de sacarosa a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C. Líneas corresponden a las ecs. (6 y 7).

Figure 4. Kinetic parameters of normalised moisture (NMC) and solids (NSC) content for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of sucrose solutions at 20 °C. Lines correspond to eqs. (6 and 7).

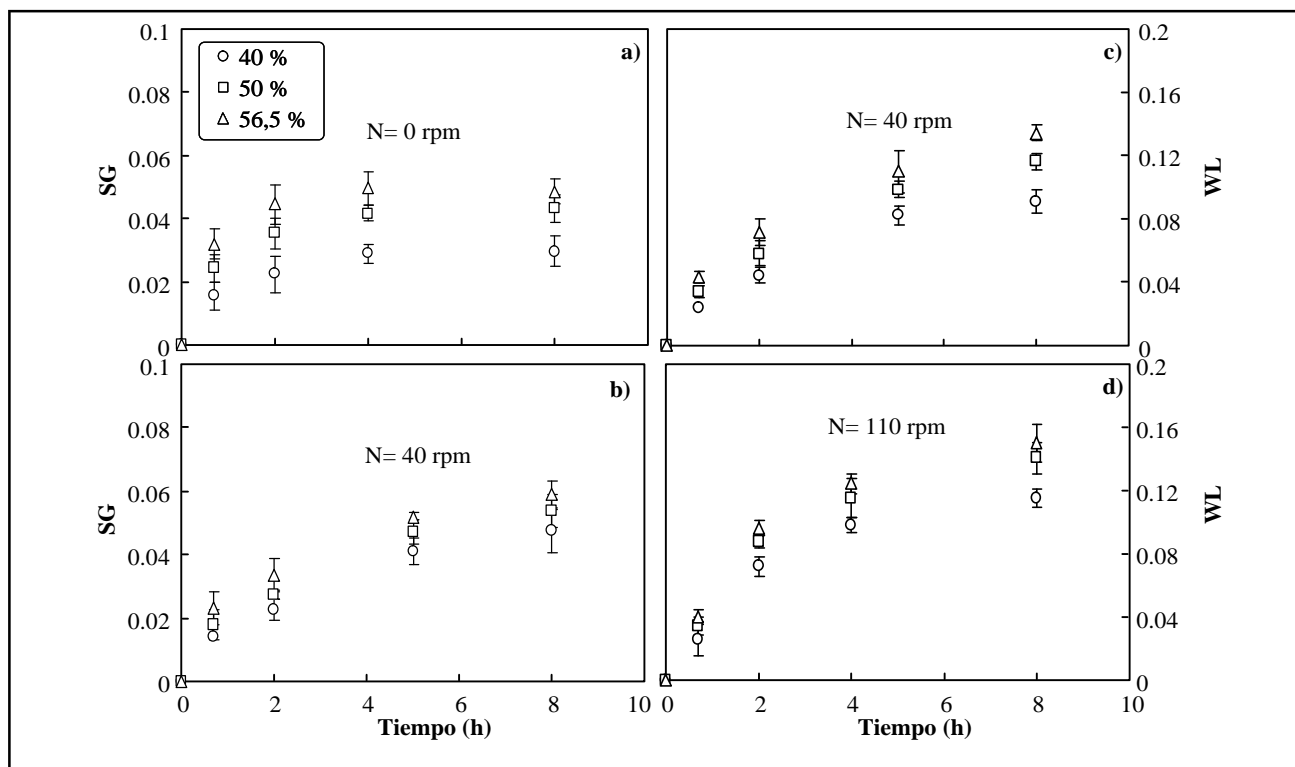


Figura 5. Parámetros cinéticos de ganancia de sólidos (SG) y pérdida de agua (WL) de la deshidratación de castaña en disoluciones de glucosa a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C.

Figure 5. Kinetic parameters of solids gain (SG) and water loss (WL) for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of glucose solutions at 20 °C.

aproxima al equilibrio (el 90% de los datos se desvían menos del 3,5%). En la Tabla 2 se presentan los valores de los coeficientes de transferencia de materia obtenidos. En general, todos los parámetros experimentan un aumento en sus valores con el aumento de la concentración y agitación del medio.

A los valores del coeficiente de difusividad efectiva y de la difusividad del agua en la muestra sólida, para la velocidad de agitación de 110 rpm, se les asigna valores iguales, es decir, se supone que a ese grado de agitación toda la resistencia a la transferencia de masa está dentro del sólido (Tabla 2). Un análisis de los valores permite concluir que el aumento de la concentración del medio hace aumentar el coeficiente de difusividad efectiva.

Con los valores de la difusividad del agua en el sólido y a través de la ecuación (10) se calcula el coeficiente de transferencia de masa externo (k_{ext}) para las diferentes concentraciones del medio osmótico y para velocidades de agitación de 0 y 40 rpm. Los coeficientes de transferencia de masa, cuando la velocidad de agitación es 0 son más bajos que para velocidades superiores, como era de esperar, ya que existe un gradiente de concentración en la superficie externa de la castaña, provocado por la impregnación de la castaña a causa del soluto osmótico.

Ósmosis con disoluciones de glucosa

Mediante las ecuaciones (2) y (3) se calculan los parámetros SG y WL (Figura 5) para algunos casos de las concentraciones de glucosa (40, 50 y 56,5 % p/p), velocidades de agitación (0, 40 y 110 rpm) y temperatura de 20 °C, en función del tiempo de ósmosis. Estos parámetros se muestran también para la velocidad de agitación de 110 rpm y temperatura de 50 °C (Figura 7 (a y b)). Como se observó en el caso de la sacarosa, en la ósmosis con glucosa se aprecia una intensa transferencia de materia en los momentos iniciales del proceso (glucosa hacia el interior de la castaña y agua hacia el medio osmótico) que va disminuyendo progresivamente debido al decrecimiento de la fuerza impulsora. Los valores de los parámetros SG y WL aumentan con la concentración del medio osmótico, es decir, una mayor concentración del soluto osmótico hace que la deshidratación sea más intensa. Por su parte, en medio estático, datos acordes con la bibliografía (Chenlo *et al.*, 2006b), la velocidad del proceso es menor que en dinámico debido probablemente a la formación de costras que provocan una barrera o resistencia al transporte másico, de modo que se puede concluir que la agitación del medio favorece la transferencia de materia en la deshidratación por ósmosis.

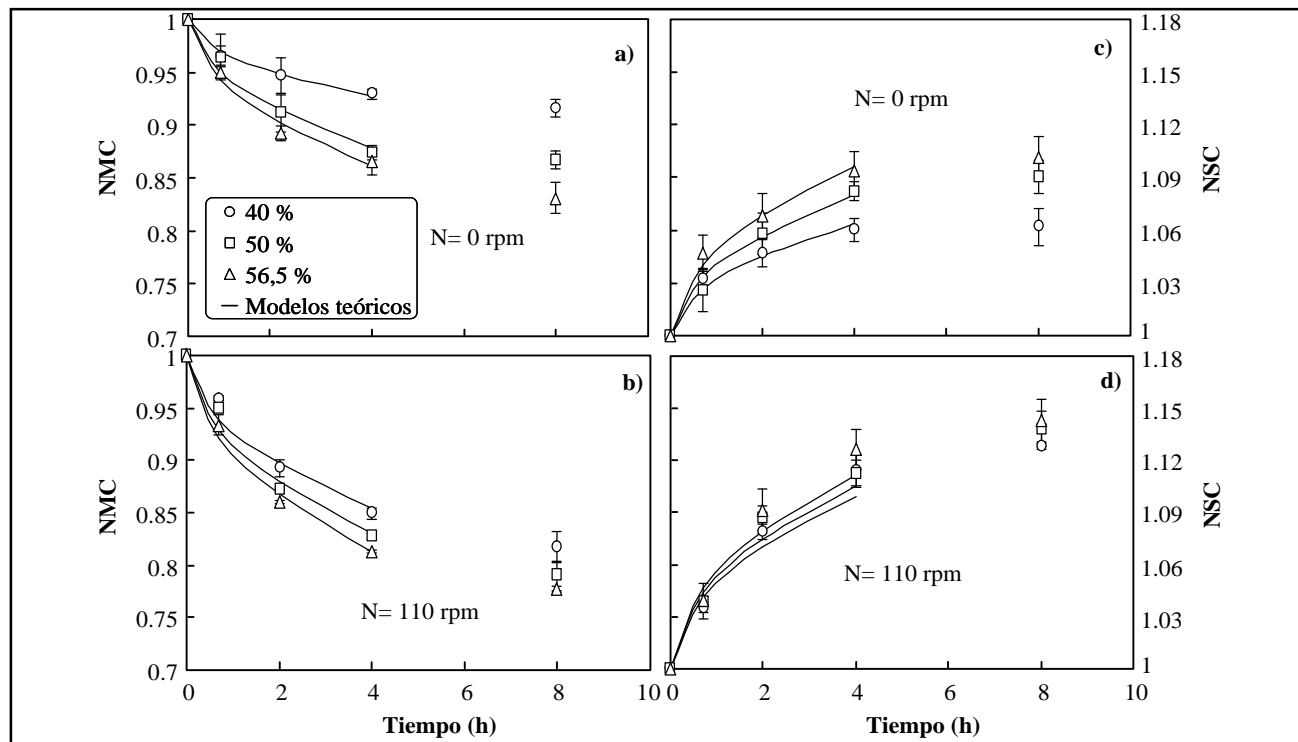


Figura 6. Parámetros cinéticos de contenido normalizado de humedad (*NMC*) y de sólidos (*NSC*) de la deshidratación de castaña en disoluciones de glucosa a diferente concentración y velocidad de agitación, a 20 °C. Líneas corresponden a las ecs. (6 y 7).

Figure 6. Kinetic parameters of normalised moisture (*NMC*) and solids (*NSC*) content for chestnut dehydration at different concentrations and stirring rates of glucose solutions at 20 °C. Lines correspond to eqs. (6 and 7).

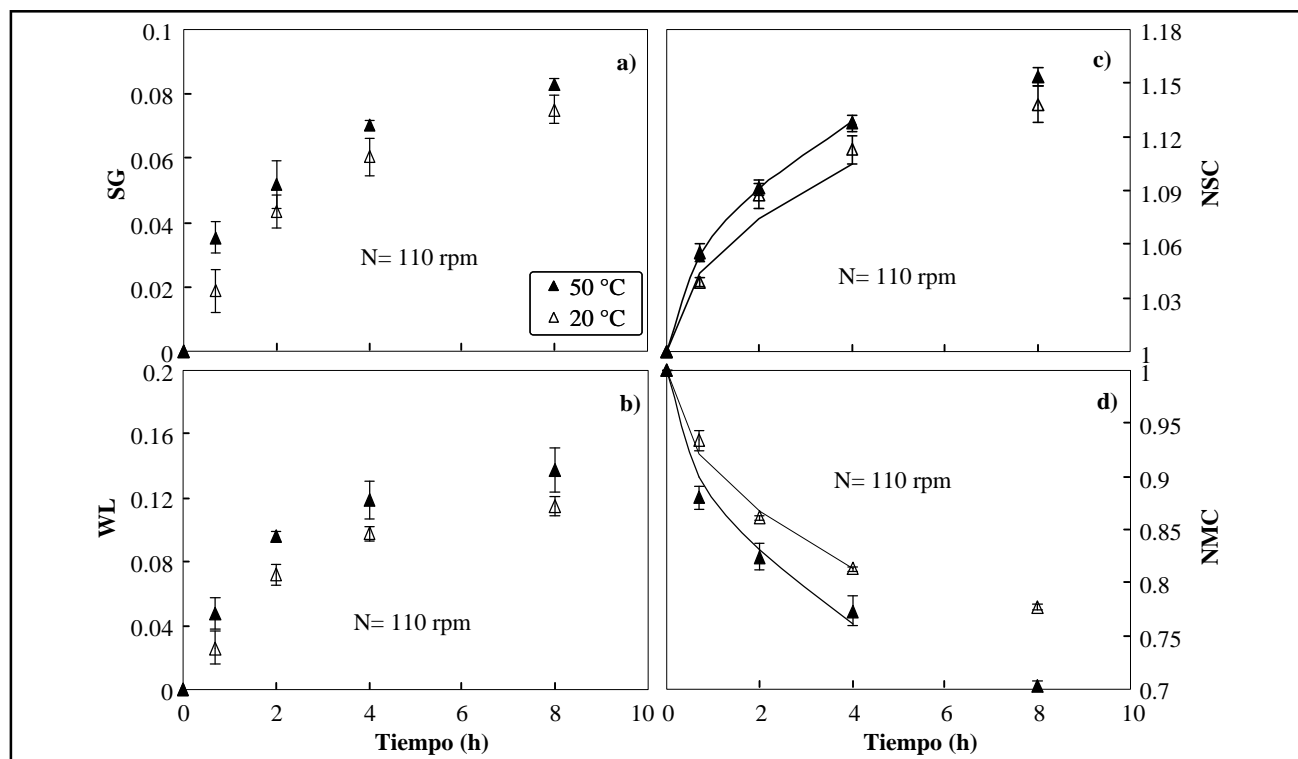


Figura 7. Influencia de la temperatura en la deshidratación de castaña en disoluciones de glucosa con agitación del medio de 110 rpm y diferente concentración: a) y d) 56,5 % p/p; b) 40 % p/p y c) 50 % p/p. Líneas corresponden a las ecs. (6 y 7).

Figure 7. Temperature effect on chestnut dehydration using glucose solutions stirred at 110 rpm and at different concentration: a) and d) 56.5 w/w; b) 40 % w/w and c) 50 % w/w. Lines correspond to eqs. (6 and 7).

Tabla 3. Coeficientes de la ecuación de Hawkes-Flink para el agua (k_w) y el soluto (k_s) para la deshidratación en glucosa (40, 50 y 56,5 % p/p), velocidad de agitación del medio de 110 rpm, a 20 y 50 °C.

Table 3. Coefficients of Hawkes-Flink equation for water (k_w) and solute (k_s) during dehydration using glucose (40, 50, and 56.5 % w/w), at 110 rpm of stirring rate at 20 and 50 °C.

Medio osmótico: Glucosa	Concentración (% p/p)	Temperatura (°C)			
		20	R^2	50	R^2
k_w ($h^{-0.5}$)	40	0,073	0,98	0,084	0,97
	50	0,085	0,95	0,104	0,99
	56,5	0,093	0,97	0,120	0,98
k_s ($h^{-0.5}$)	40	0,055	0,99	0,055	0,99
	50	0,057	0,98	0,064	0,99
	56,5	0,062	0,98	0,076	0,98

Observando los valores de SG y de WL se puede concluir que la temperatura influye de diferente modo en ambos parámetros, ya que se produce un aumento para el WL (25 %), y para el SG se puede considerar prácticamente invariable.

Con los valores finales de SG y WL (obtenidos después de 8 h de contacto con el medio osmótico) se calcula el parámetro WL/SG (Tabla 1). El valor de WL/SG para el caso del medio osmótico más concentrado (56,5 % p/p de glucosa) y de que no exista agitación, aumenta un 28% respecto al valor obtenido cuando la concentración de glucosa es de 40%. Se puede afirmar que en medios estáticos, la concentración de glucosa más favorable (en el intervalo ensayado) es de 56,5% p/p. Por otra parte, una vez más al igual que en los casos anteriores, se observa que la agitación provoca la disminución de este parámetro. La temperatura favorece el aumento del parámetro WL/SG , obteniéndose el valor más elevado para la concentración de 56,5 % p/p a la velocidad de 110 rpm y temperatura de 50 °C (Tabla 1). En medios estáticos el efecto de la temperatura fue el contrario, por el aumento más pronunciado del flujo de adquisición de solutos (Chenlo *et al.*, 2006b).

Los parámetros NMC y el NSC se calculan como en los casos anteriores (Figura 6). Se observa un aumento del contenido de sólidos durante el tiempo del proceso, siendo este aumento más acentuado hasta 4 h de deshidratación. En lo que se refiere al contenido de humedad tiene un comportamiento inverso, es decir, disminuye durante el tiempo de deshidratación, al igual que en los casos anteriores con sal y sacarosa. Se observa que el NMC y el NSC disminuyen y aumentan, respectivamente, con el aumento de la concentración del medio. El aumento de la concentración del soluto y de la velocidad de agitación del medio osmótico, generan una reducción del contenido de humedad de la castaña, implicando también un aumento del contenido de sólidos. Los resultados obtenidos para estos parámetros a la temperatura de 50 °C se muestran en la Figura 7 (c y d).

Mediante el modelo propuesto por Hawkes e Flink (1978), para describir las cinéticas de la pérdida del contenido de humedad y de los sólidos ganados, se

obtienen, por ajuste, los valores de los coeficientes de transferencia de materia del agua (k_w) y del sólido (k_s). Los valores experimentales de NMC y NSC se modelizan hasta las 4 h de deshidratación osmótica (Tabla 2). Se concluye que dicho modelo ajusta satisfactoriamente los parámetros NMC y NSC pudiéndose decir que los valores de los coeficientes de transferencia de materia del agua y del sólido obtenidos por los ajustes son muy próximos a los valores experimentales (desviaciones inferiores al 4 % para el 90 % de los casos). Los coeficientes de transferencia de materia aumentan con la concentración del medio osmótico y con la velocidad de agitación del mismo. La temperatura influye en los coeficientes de transferencia de materia, de tal forma que un aumento de la temperatura origina un aumento de los mismos, siendo el coeficiente de transferencia de materia del agua el más afectado por la temperatura.

A través de las ecuaciones (8) y (9) se calculan los coeficientes de difusividad efectiva y, consecuentemente, la difusividad del agua en el sólido para la velocidad de agitación de 110 rpm (Tabla 2). La resistencia a la transferencia de masa está dentro del sólido, ya que con esta velocidad de agitación se elimina el gradiente de concentración externo. Un análisis de estos datos permite decir que el aumento de la concentración del medio osmótico aumenta el coeficiente de difusividad efectiva. Seguidamente, con los valores de difusividad del agua en el sólido, a través de la ecuación (10) se calculan los coeficientes de transferencia de masa externo, k_{ext} , (Tabla 2) para las diferentes concentraciones del medio osmótico y para velocidades de agitación de 40 y 0 rpm. Los valores del coeficiente de transferencia de masa, cuando no existe agitación inducida (mayor resistencia), son menores que para velocidades de agitación de 40 rpm, como era de esperar. También se calculan los valores de los coeficientes de transferencia del agua y del sólido (modelo de Hawkes) del agua en el sólido, para diferentes concentraciones de glucosa (40, 50 y 56,5 % p/p), velocidades de agitación de 110 rpm a la temperatura de 50 °C (Tabla 3) concluyéndose que ambos parámetros aumentan con la concentración del soluto y con la temperatura del medio.

CONCLUSIONES

Los parámetros cinéticos característicos empleados para el análisis de la deshidratación osmótica, SG , WL , NMC , NSC , para todos los solutos osmóticos ensayados, aumentaron con la concentración y el nivel de agitación. Los sistemas mostraron comportamientos comunes, mostrando una velocidad apreciable, independientemente del soluto empleado, durante las primeras 4 h de ensayo y, posteriormente, una reducción tendiendo a un comportamiento asintótico. Para efectos industriales, no es procedente sobrepasar el tiempo de 4 h de tratamiento osmótico, minimizando así los costos de operación.

La relación pérdida de agua-ganancia de sólidos, WL/SG , determinada a los mayores tiempos de contacto, aumenta con la concentración del medio osmótico y disminuye con la velocidad de agitación, independiente de la naturaleza del mismo.

La velocidad de agitación del medio acuoso osmótico da lugar a una mayor intensidad del proceso de deshidratación y de ganancia de sólidos a medida que la agitación aumenta, independientemente de la naturaleza del medio osmótico. Se constata que la agitación favorece la transferencia de masa al reducir las resistencias externas que existen entre el medio y la castaña y que parte de la resistencia global al transporte se encuentra en el medio osmótico.

La temperatura a la que se realiza la deshidratación (ensayada únicamente en los sistemas con glucosa) favorece la intensidad del proceso significando mayores valores de todos los parámetros cinéticos evaluados.

Los coeficientes de la transferencia de materia (agua y soluto osmótico), k_w y k_s , evaluados a través del modelo propuesto por Hawkes y Flink, aumentan con la concentración y velocidad de agitación del medio osmótico, independientemente de la naturaleza del mismo. La disponibilidad de estos parámetros ha permitido establecer la modelización correspondiente al proceso y predecir la velocidad del mismo.

Por último, los coeficientes de la difusividad efectiva del agua, D_{eff} , y de la difusividad del soluto osmótico en el interior de las muestras, D_s aumenta, con ligeras anomalías, con la concentración y la velocidad de agitación del medio osmótico, independientemente de su naturaleza. El mismo comportamiento presenta el coeficiente externo a la transferencia de materia, k_{ext} .

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Xunta de Galicia (España) y a FEDER el apoyo parcial con el proyecto PGI-DIT04TAL265004PR.

REFERENCIAS

- AOAC. *Oficial Methods of Analysis*. 1995. Association of Official Analytical Chemists, Washington.
- Bergougnot, F.; Verlhac, A.; Breisch, H.; Chapa, J. 1978. Le chataignier-Production et culture. CTIFL, París.
- Breisch, H. 1996. Châteignes et marrons. Éditions Ventre Technique Interprofessionnel des fruits et légumes, París.
- Bohuon, P.; Collignan, A.; Rios, G. M.; Raoult-Wack, A. L. 1998. Soaking process in ternary liquids: experimental study of mass transport under natural and forced convection. *Journal of Food Engineering* **37**, 451-459.
- Cavarna, M. 1992. La Lavorazione del frutto fresco. *ATTI de Convegno Nazionale sulla Castanicoltura da Frutto*. pp: 351-365. Avellino.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford University Press, New York.
- Chenlo, F.; Moreira, R.; Fernández, C.; Vázquez, G. 2006a. Mass Transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions. *Journal of Food Engineering* **73**, 164-173.
- Chenlo, F.; Moreira, R.; Fernández, C.; Vázquez, G. 2006b. Experimental results and modelling of the osmotic dehydration kinetics of chestnut with glucose solutions. *Journal of Food Engineering* **74**, 324-334.
- Chenlo, F.; Moreira, R.; Fernández, C.; Vázquez, G. 2007. Osmotic Dehydration of chestnut with sucrose: Mass transfer processes and global kinetics modelling. *Journal of Food Engineering* **78**, 765-774.
- De la Montaña, J.; Míguez, M.; García, J. M.; 2004. Composition of varieties of chestnut from Galicia (Spain). *Food Chemistry* **84**, 401-404.
- Giraldo, G.; Talens, P.; Fito, P.; Chiralt, A. 2003. A influence a sucrose solutions concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* **58**, 33-43.
- Hawkes, J.; Flink, J. M. 1978. Osmotic Concentration of Fruit Slices Prior to Freeze Dehydration. *Journal of Food Preservation* **2**, 265-284.
- Jayaraman, K. S.; Das Gupta, D. K. 1992. Dehydration of fruits and vegetables: Recent developments in principles and techniques. *Drying Technology* **10**, 1-50.
- Karathanos, V. T.; Kostaropoulos, E.; Saravacos, G. D. 1995. Air Drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology* **13**, 1503-1521.
- Lerici, C. L.; Pinnavaia, G.; Dalla Rosa, M.; Bartolucci, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *Journal Food Science* **50**, 1217-1219.
- Moreira, R.; Sereno, A. M. 2003. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage

- during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering* **57**, 25-31.
- Moreira, R.; Chenlo, F.; Torres, M. D.; Vázquez, G. 2007. Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. *LWT* **40**, 1507-1514.
- Panagiotou, N. M.; Karathanos, V. T.; Maroulis, Z. B. 1999. Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology* **17**, 175-189.
- Raoult-Wack, A. L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science and Technology* **5**, 225-260.
- Rastogi, N. K.; Raghavarao, K. S. M. S.; Nirajan, K.; Knorr, D. 2002. Recent development in osmotic dehydration: Methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology* **13**, 48-59.
- Sacchetti, G.; Pinnavaia, G. G.; Guidolin, E.; Dalla-Rosa, M. 2004. Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International* **37**, 527-534.
- Telis, V. R. N.; Murari, R. C. B. D. L.; Yamashita, F. 2004. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. *Journal of Food Engineering* **74**, 253-262.
- Tonon, R.V.; Baroni, A. F.; Hubinger, M. D. 2007. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. *Journal of Food Engineering* **82**, 509-517.