

TRANSFERENCIA DE MASA EN DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE FRUTAS. DETERMINACION EXPERIMENTAL Y SIMULACION

Bianchi, M.^{2,*}, Milisenda, P.², Guarnaschelli, A.², Mascheroni, R.H.¹

**1 CIDCA (Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos)
(CCT La Plata - CONICET y UNLP). 47 y 116, 1900 La Plata, Argentina, y
MODIAL (Facultad de Ingeniería UNLP), La Plata, Argentina**

**2 Facultad de Química, Universidad del Centro Educativo Latinoamericano UCEL
Avenida Pellegrini 1332, 2000 Rosario, Argentina
* mjbianchi@gmail.com**

RESUMEN

Se determinaron experimentalmente la pérdida de agua y ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de rodajas de pera y kiwi en soluciones de sacarosa de 40 y 60 °Brix. A partir de los datos experimentales se determinaron los coeficientes de difusión aparentes del agua y sacarosa, utilizando la ley de Fick. También se obtuvieron relaciones empíricas de Pérdida de Agua y Ganancia de Sólidos en función del tiempo.

1-INTRODUCCION

La deshidratación osmótica (DO) consiste básicamente en la remoción del contenido de agua del producto con un aumento simultáneo de sólidos por efecto de la presión osmótica, que ocurre por inmersión de un alimento sólido (entero o en trozos) en una solución hipertónica de uno o más solutos (agente deshidratante) por un cierto tiempo y temperatura específicos. Además de los flujos de salida de agua y entrada de solutos en el alimento, se observa flujo de salida de solutos de bajo peso molecular del propio producto (azúcares, ácidos orgánicos, sales y vitaminas), que ocurre en cantidades despreciables, pero ejerce una importante influencia con relación a la composición y calidad del producto final (Raoult-Wack, 1994).

Las principales variables que afectan la transferencia de masa durante el proceso son: la concentración y la temperatura de la disolución osmótica, el tiempo de inmersión, la estructura (porosidad) del alimento, la geometría (tamaño, forma y área superficial), la composición de la disolución (peso molecular y naturaleza del soluto), la presión (vacío o atmosférica), el nivel de agitación, la relación disolución-producto y el pretratamiento del producto (Rastogi y Raghavarao, 1996; van Nieuwenhuijzen y col., 2001; Rastogi y Raghavarao, 2002; Sablani y Rahman, 2003).

En los últimos años, numerosos estudios se llevaron a cabo para mejorar el conocimiento sobre la transferencia de masa interna que ocurre durante la deshidratación osmótica de alimentos, como así también para modelar el mecanismo del proceso (Spiazzi y Mascheroni, 1997; Kaymak-Ertekin y Sultanoglu, 2000).

Para desarrollar un modelo fenomenológico que describa la transferencia de masa en la deshidratación osmótica se deben conocer los fundamentos relacionados con la fisicoquímica y la termodinámica del sistema, así como los mecanismos y las cinéticas de transferencia de masa (Barat, 1998).

En lo referido a los mecanismos de transferencia de masa, pueden presentarse: *fenómenos dependientes del gradiente de concentración* que incluyen mecanismos

osmóticos y Fickianos, y que se afectan por la permeabilidad de la membrana a los diferentes componentes; *mecanismos dependientes del gradiente de presión* (que son los mecanismos hidrodinámicos que son inducidos por la aplicación de vacío o por las tensiones liberadas en el proceso de relajación y que están condicionados por la porosidad del alimento); y los *mecanismos de vaporización-condensación* cuando se trabaja a presiones cercanas a la presión de vapor.

Cuando se quiere representar un modelo fenomenológico para procesos a presión atmosférica, se emplea el modelo de Crank, que consiste en un grupo de soluciones de la ley de difusión de Fick para diferentes geometrías, condiciones límite y condiciones iniciales desarrollado por Crank (Crank, 1964). Este modelo ha sido empleado por muchos autores ya que es el modelo fenomenológico más conocido para representar el mecanismo difusional (Ochoa-Martínez y Ayala-Aponte, 2005).

También es común utilizar modelos fenomenológicos muy simples, sólo válidos para condiciones operativas similares a las experimentales (Spiazzi y Mascheroni, 1997).

El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de la concentración de la solución osmótica sobre la velocidad de transferencia de masa en diferentes frutas (rodajas de kiwi y pera de 1 cm de espesor) y desarrollar un modelo fenomenológico y otro empírico para simular la deshidratación osmótica de ambas frutas.

2- EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 *Materia Prima*

Se utilizaron peras de la variedad Packham's y kiwis de la variedad Hayward comprados en la ciudad de La Plata, usando como criterio de selección: nivel de maduración, mismo tamaño y forma, para obtener muestras relativamente homogéneas.

2.1.2 *Agente Deshidratante*

Sacarosa comercial (Ledesma – Buenos Aires – Argentina)

2.2 Métodos

2.2.1 *Deshidratación Osmótica*

Ambos tipos de frutas fueron seleccionadas y lavadas en agua corriente para remoción de suciedad superficial. Luego, fueron peladas manualmente y cortadas en rodajas de 1 cm de espesor, utilizando cuchillo de acero inoxidable. Las muestras fueron pesadas y colocadas en vasos de precipitado con una solución deshidratante a 30 °C.

Las dos concentraciones de sacarosa empleadas en el ensayo fueron de 40 y 60 ° Brix.

La relación muestra:solución utilizada fue de 1:10 (p/p) para garantizar una concentración de solutos prácticamente constante durante todo el proceso.

Los ensayos de deshidratación osmótica fueron realizados en un baño termostático, marca FERCA, modelo TT 400 con agitación lineal (110 ciclos por minuto), durante 24 horas con extracción de muestras en tiempos sucesivos correspondientes a: 0, 1, 2, 4, 8, 16, 24 y 72 horas de proceso.

Luego del tiempo de inmersión requerido, las muestras fueron drenadas, colocadas sobre papel absorbente para remoción de solución en exceso y pesadas nuevamente para la determinación de pérdida de peso en relación a la masa inicial del producto.

La evolución de la transferencia de masa durante el proceso fue monitoreada a través de la variación en el tiempo de la pérdida de peso (WR), contenido de sólidos totales (TS)

y de sólidos solubles (°Brix). La determinación de estos parámetros fue realizada por duplicado, utilizando las siguientes expresiones:

- *Reducción de Peso (WR)*: fue calculada en una balanza semianalítica a partir de la diferencia de peso de la muestra antes y después de cada tiempo de tratamiento.

$$WR (\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde: WR: pérdida de peso de producto deshidratado (%); m_i : masa inicial de la muestra fresca y m_f : masa de muestra deshidratada osmóticamente a tiempo t .

- *Sólidos Totales (TS)*: fueron determinados en una estufa de vacío a 70 °C (A.O.A.C., 2002) hasta alcanzar un peso constante.

$$TS (\%) = \left(\frac{m_s}{m_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

donde: m_s : peso de la muestra seca y m_0 : peso de la muestra fresca.

- *Contenido de Sólidos Solubles (°Brix)*: fueron medidos en un refractómetro (Bellinham + Stanley Limited).

A partir de estos valores experimentales, se evaluaron los parámetros cinéticos del proceso de DO:

- *Pérdida de Agua*: se calculó en términos porcentuales con la siguiente ecuación:

$$WL (\%) = \left(\frac{m_{wo} - m_{wf}}{m_{wo}} \right) \times 100 \quad (3)$$

siendo: WL = pérdida de agua del producto deshidratado (%); m_{wo} = masa inicial de agua de la muestra (g) y m_{wf} = masa final de agua de la muestra (g)

- *Ganancia de Sólidos*: la ganancia de sólidos, o incorporación de azúcares, fue calculada por medio de la siguiente ecuación:

$$SG (\%) = WL - WR \quad (4)$$

siendo: SG = ganancia de sólidos (incorporación de azúcares) (%).

2.2.2 Modelos utilizados

El primer modelo utilizado para ambos productos, está basado en la Ley de Difusión de Fick para estado no estacionario, que calcula la cantidad de agua que abandona la fruta y los sólidos solubles que difunden hacia la fruta, como una función del tiempo. Las siguientes suposiciones fueron usadas en el desarrollo del modelo: las rodajas de kiwi y pera de 1 cm de espesor se consideraron placas infinitas; las concentraciones iniciales de agua y sólidos solubles en ambas frutas fueron uniformes; el proceso es isotérmico (30 °C); el coeficiente de difusión aparente es constante ($D \neq f(C)$); flujos simultáneos en contra corriente: difusión de agua desde la fruta y difusión de azúcar hacia la fruta son solamente considerados, otros mecanismos de transferencia son despreciados; se considera que un film de solución de azúcar está adherido a la superficie de la fruta como una capa límite (se asume que este film está a la concentración de equilibrio y que el proceso procede directamente por difusión); se desprecia el encogimiento.

Este fenómeno, en difusión unidimensional puede describirse con la Ley de Fick para

estado no estacionario dada por las siguientes expresiones:

- Para agua:

$$\frac{\partial C^w}{\partial t} = D^w \frac{\partial^2 C^w}{\partial x^2} \quad (5)$$

- Para sólidos solubles:

$$\frac{\partial C^s}{\partial t} = D^s \frac{\partial^2 C^s}{\partial x^2} \quad (6)$$

Donde: C: concentración; D: coeficiente de difusión efectivo; t: tiempo; x: distancia desde el centro de la placa y los supraíndices: w: agua y s: sólidos solubles, siendo sacarosa en este caso.

Condiciones iniciales:

- $C = C_0$ en $t = 0$ y $-L/2 < x < +L/2$

Condiciones de contorno:

- $C = C_1$ para $t > 0$; $x = \pm L/2$

donde C_0 y C_1 son las concentraciones inicial y global (promedio en todo el volumen de solución), respectivamente.

La solución de la ecuaciones (5) y (6) promediada en el volumen, considerando que hay algo de soluto inicialmente presente en el sólido, puede escribirse como (Crank, 1975):

$$\frac{W - W_\infty}{W_i - W_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ -D^w (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right\} \quad (7)$$

$$\frac{S - S_\infty}{S_0 - S_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ -D^s (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right\} \quad (8)$$

donde: D^w y D^s : coeficientes de difusión efectivos para el agua y el azúcar respectivamente; l : medio espesor de la rodaja de fruta = $L/2$; W : contenido medio de agua en la fruta a tiempo t ; W_i : contenido medio de agua en la fruta a tiempo $t = 0$ (contenido inicial de humedad); W_∞ : contenido medio de agua en la fruta a tiempo $t = \infty$ (concentración de equilibrio); S : contenido medio de sacarosa en la fruta a tiempo t ; S_0 : contenido medio de sacarosa en la fruta a tiempo $t = 0$ (concentración inicial) y S_∞ : contenido medio de sacarosa en la fruta a tiempo $t = \infty$ (concentración de equilibrio).

El segundo modelo utilizado, desarrollado por Azuara y col., (1992), se usó sólo para determinar las concentraciones del film en la capa límite en la superficie de cada fruta, asumiendo que está a la concentración de equilibrio de la solución durante el proceso de ósmosis. En este modelo, los autores realizaron un balance de masa sobre el movimiento de agua dentro del alimento, obteniéndose la siguiente expresión de la velocidad de pérdida de agua WL como una función del tiempo:

$$WL = \frac{S_1 t WL_\infty}{1 + S_1 t} \quad (9)$$

donde: WL_{∞} : fracción de la pérdida de agua en el equilibrio; S_1 : constante del modelo relacionada con la velocidad de pérdida de agua y t : tiempo.

La ecuación anterior se linealiza mediante la siguiente expresión:

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 WL_{\infty}} + \frac{t}{WL_{\infty}} \quad (10)$$

De forma similar, para la Ganancia de Sólidos SG se obtiene:

$$\frac{t}{SG} = \frac{1}{S_2 SG_{\infty}} + \frac{t}{SG_{\infty}} \quad (11)$$

donde: SG_{∞} : fracción de la ganancia de sólidos solubles en el equilibrio y S_2 : constante del modelo relacionada con la velocidad de ganancia de sólidos.

Utilizando los valores calculados de WL y SG obtenidos de los datos experimentales para cada tiempo de proceso estudiado, la pérdida de agua en el equilibrio (WL_{∞}) y la constante S_1 fueron estimados de la pendiente e intercepción del gráfico t/WL vs t , mientras que la ganancia de sólidos en el equilibrio (SG_{∞}) y la constante S_2 fueron determinados de la pendiente e intercepción del gráfico t/SG vs t .

El tercer enfoque utilizado fue hallar relaciones fenomenológicas simples entre los datos experimentales de WL o SG y el tiempo de DO, utilizando las facilidades provistas por el software Excel, eligiendo aquella que tuviese mayor coeficiente de correlación.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1-4 se observan las evoluciones de los parámetros: WL y SG de las rodajas de pera y kiwi, respectivamente, durante las experiencias de DO, utilizando sacarosa como agente deshidratante con concentraciones de 40 y 60 °Brix.

De acuerdo a las Figuras 1 y 3, se observa una mayor velocidad de *Pérdida de Agua WL* en ambas frutas durante las 4 primeras horas de proceso en comparación con la pérdida de agua alcanzada en las 72 horas de deshidratación, principalmente en los ensayos realizados con sacarosa a 60° Brix, consecuencia de una mayor fuerza osmótica de deshidratación existente entre el alimento y la solución hipertónica al inicio del proceso. Además, en ambos ensayos, se observó una tendencia a la estabilización hacia las 72 horas de proceso, fundamentalmente debido a una aproximación a la condición de equilibrio. El aumento de la concentración de solución osmótica favorece la pérdida de agua en el producto debido al mayor gradiente de presión osmótica en la interfase producto/solución, proporcionando una mayor velocidad de transferencia de masa.

Con relación a la *Ganancia de Sólidos SG*, en las Figuras 2 y 4, se observa que un incremento en la concentración de sacarosa aumenta significativamente el ingreso de sólidos en ambos productos. El efecto de la concentración de la solución osmótica sobre la transferencia de masa está más marcado para el caso de la pera, que en el kiwi, donde se podría deducir que pasadas las 72 horas la solución más concentrada (60 °Brix) limitó la entrada de sólidos al producto por la formación de una costra superficial de azúcar alrededor de la fruta.

Ambos resultados de WL y SG muestran las mismas tendencias tanto para la pera como para el kiwi, pero en este último caso la velocidad de ambos fenómenos es mucho

mayor. Este comportamiento puede atribuirse a las diferencias en la estructura celular de cada fruta.

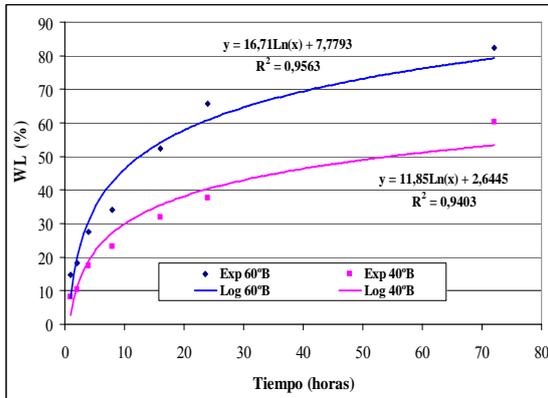


Figura 1. Pérdida de Agua WL en pera durante 72 horas de proceso para las dos condiciones estudiadas

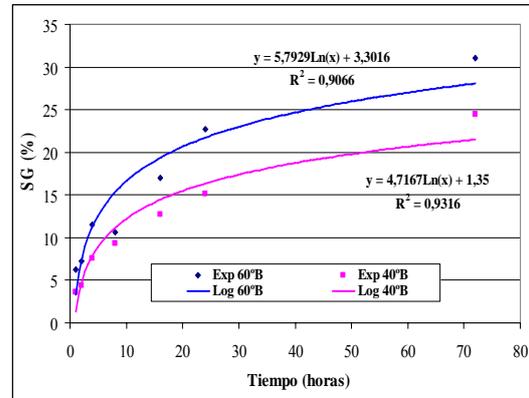


Figura 2. Ganancia de Sólidos SG en pera durante 72 horas de proceso para las dos condiciones estudiadas

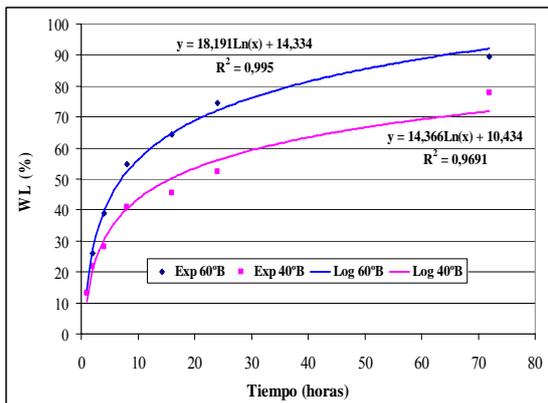


Figura 3. Pérdida de Agua WL en kiwi durante 72 h para las dos condiciones estudiadas

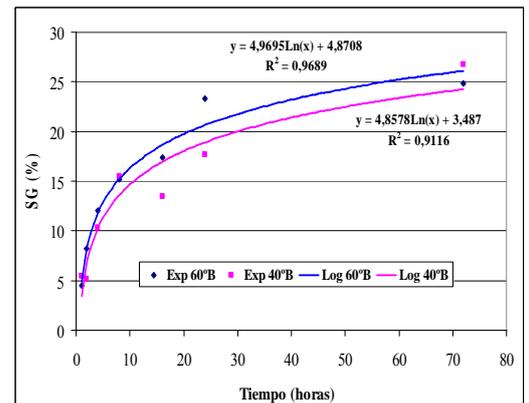


Figura 4. Ganancia de Sólidos SG en kiwi durante 72 h para las dos condiciones estudiadas

A continuación, en la Tabla 1, se presentan los valores de los coeficientes de difusión aparentes durante la DO de las frutas estudiadas y en ambas concentraciones, obtenidos graficando en escala logarítmica el valor de las concentraciones adimensionales vs tiempo y ajustando al primer término de las ec. (7) y (8) (aproximación para tiempos largos). Se observa que los coeficientes son claramente más altos para la solución de 60 °Brix, para sacarosa respecto de agua y para kiwi comparados con los de pera.

Tabla 1. Valores de los coeficientes de difusión aparentes durante la DO de peras

Fruta y condiciones	D Agua (m ² /s)	D Sacarosa (m ² /s)
Kiwi 40 °Brix	6,19 10 ⁻¹¹ (R ² = 0,867)	3,01 10 ⁻¹⁰ (R ² = 0,957)
Kiwi 60 °Brix	1,18 10 ⁻¹⁰ (R ² = 0,973)	3,91 10 ⁻¹⁰ (R ² = 0,836)
Pera 40 °Brix	7,32 10 ⁻¹¹ (R ² = 0,987)	7,88 10 ⁻¹¹ (R ² = 0,992)
Pera 60 °Brix	9,85 10 ⁻¹¹ (R ² = 0,955)	1,18 10 ⁻¹⁰ (R ² = 0,882)

En el caso de las regresiones empíricas – se probaron logarítmicas, polinómicas y potenciales -, las que dieron mejores coeficientes de correlación (en todos los casos superiores a 0,91) fueron las del tipo $y = A \ln(x) + B$, con $y = WL$ o SG y $x = t$. En las Figuras 1 a 4 se agregan las curvas de dichas regresiones con sus respectivas fórmulas y coeficientes de correlación.

4- CONCLUSIONES

- Las rodajas de peras sufren menor pérdida de agua y ganancia de sólidos que las de kiwis en iguales condiciones de proceso en soluciones de sacarosa.
- Las soluciones mas concentradas producen mayores variaciones en las concentraciones de agua y sacarosa, lo que se verifica por los mayores coeficientes de difusión calculados.
- Durante las primeras cuatro h de DO, tanto en solución de sacarosa de 40 como de 60 °Brix, el proceso es mucho más rápido que a tiempos posteriores.
- Luego de 72 h de deshidratación aún no se alcanza el equilibrio con la solución.
- Tanto la solución analítica de difusión como las regresiones empíricas son adecuadas para simular el proceso de DO.

5- REFERENCIAS

- A.O.A.C. (2002) Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th ed., Ed. William Horwitz., Gaithersburg.
- Azuara, E.; Cortés, R.; García, H. S.; Beristain, C. I. (1992) Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 409-418.
- Barat, J. M. (1998) Desarrollo de un modelo de la deshidratación osmótica como operación básica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Crank, J. (1964) *The mathematics of Diffusion*. Ed. University Press: Oxford.
- Kaymak-Ertekin, F.; Sultanoglu, M. (2000) Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46, 243-250.
- Ochoa-Martínez, C. I., Ayala-Aponte, A. (2005) Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4, (5), 330-342.
- Raoult-Wack, A. L. (1994) Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 5, (8), 255-260.
- Rastogi, N. K.; Raghavarao, K. S. (1996) Kinetics of osmotic dehydration under vacuum. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 29, 669-672.
- Rastogi, N. K.; Raghavarao, K. S. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Foods Science and Technology*, 13 (2), 48-59.
- Sablani, S. S.; Rahman, M. S. (2003) Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*, 36, 65-71.
- Spiazzi, E. A.; Mascheroni, R. H. (1997) Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables. I. Development of the simulation model. *Journal of Food Engineering*, 34, 387-410.
- van Nieuwenhuijzen, N. H., Zareifard, M. R.; Ramaswamy, H. S. (2001) Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. *Drying Technology*, 19 (3 & 4), 525-545.