

INFLUENCIA DE UN PRE-TRATAMIENTO OSMÓTICO SOBRE LA DESHIDRATACIÓN POR AIRE CALIENTE DE MANZANA *GRANNYSMITH*

INFLUENCE OF OSMOTIC PRETREATMENT ON THE HOT AIR-DRYING OF *GRANNYSMITH* APPLE

LUIS PUENTE

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, Universidad de Chile, Santiago-Chile, lpuente@ciq.uchile.cl

SILVIO LASTRETO

Escuela de Industria Alimentaria, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago-Chile

MARÍA JOSÉ MOSQUEDA

Escuela de Industria Alimentaria, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago-Chile

JORGE SAAVEDRA

*Escuela de Ingeniería de Alimentos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso-Chile
Centro Regional de Estudios en Alimentos Saludables (CREAS)*

ANDRES CORDOVA

*Escuela de Ingeniería de Alimentos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso-Chile
Centro Regional de Estudios en Alimentos Saludables (CREAS)*

Recibido para revisar Mayo 5 de 2009, aceptado Diciembre 10 de 2009, versión final Marzo 11 de 2010

RESUMEN: En este trabajo se estudió la influencia de un pretratamiento osmótico (DO) a tres concentraciones (30, 40 y 50 °Brix) sobre un proceso de deshidratación de manzana por aire caliente (SAC) a dos temperaturas (55 y 65 °C). Las velocidades de deshidratación fueron mayores para las manzanas pretratadas en comparación al producto fresco, distinguiéndose una corta primera etapa de inducción solo en SAC, en ambos tipos de tratamiento (DO+SAC) una imperceptible segunda etapa de velocidad constante, y una clara tercera etapa de velocidad de deshidratación decreciente I y II. La velocidad de deshidratación se modeló utilizando las ecuaciones de Newton, Page y Henderson-Pabis. De estos modelos el que mejor explica el proceso fue la ecuación de Page, seguida por Newton y Henderson-Pabis. Respecto de la temperatura, los niveles ensayados fueron significativos como factor de proceso al presentar una interacción con los pretratamientos osmóticos. La mejor condición la conformó el pretratamiento osmótico DO 50° Brix con aire caliente SAC 65 °C.

PALABRAS CLAVE: Manzana, deshidratación osmótica, deshidratación por aire caliente-

ABSTRACT: In this paper we study the influence of an osmotic pre-treatment (DO) at three concentrations (30, 40 and 50 °Brix) on the implementation of a process of dehydration of apple by hot air (SAC) at two temperatures (55 and 60 °C). It was found that higher concentrations in the osmotic dehydration pretreatment occurred nondimensional moisture curves more pronounced. The drying rate was higher for apples pretreated compared with that of fresh product, distinguishing a short induction phase only in SAC, and in both types of treatment (OD + SAC) a second stage imperceptible speed and a clear third stage of decreasing drying rate I and II. The drying rate was modeled using the equations of Newton and Page. The best goodness of fit was obtained by Page model, follow by Newton and Henderson-Pabis. The two performed temperatures levels (55 °C y 65 °C) were significant, since the meaningful interaction with osmotic dehydration. The better process condition was DO 50° Brix and SAC 65 °C.

KEYWORDS: Apple, osmotic dehydration, hot air drying.

1. INTRODUCCIÓN

La deshidratación por aire caliente de productos vegetales es una de las operaciones unitarias que ampliamente es utilizada por la industria alimentaria. En ella transcurren simultáneamente transferencia de calor y masa a través de la membrana plasmática celular, acompañada de un cambio de fase. Más aún, puesto que la deshidratación implica la remoción de agua del alimento, se disminuye el potencial desarrollo de microorganismos y reacciones químicas indeseadas prolongándose la vida útil del producto [1]. Como ventajas complementarias se permite su almacenamiento y transporte a un bajo costo.

Sin embargo la remoción de agua a altas temperaturas y largos tiempos de proceso pueden ocasionar daños nutricionales y sensoriales [2-3], al tiempo que se estabiliza el producto [4]. Para reducir los efectos indeseados, suelen utilizarse una serie de pretratamientos [5], los cuales minimizan alteraciones sensoriales (perdida de color), reducción de propiedades físicas (densidad aparente y capacidad de rehidratación, entre otras) [6,7].

Los tratamientos térmicos previos al proceso constituyen son los más habituales, con fin de mantener la estabilidad sensorial del producto. Según [8], los procesos de escaldado controlado contribuyen a reducir los cambios en las sustancias pécticas, probablemente debido a la actividad de la pectinmetilesterasa.

En efecto, autores como [9] afirman que el proceso de escaldado en papas a 97°C por 2 minutos mejora la estructura y textura final, parámetros que son detectados después de someter la papa a congelación o cocción. Otros autores como [2], encontraron que muestras de coliflor sometidas a pretratamientos térmicos presentaban mejoras en la textura luego de ser rehidratadas.

Por otra parte, una serie de nuevas tecnologías utilizadas a modo de pre-tratamientos en deshidratación indican que la aplicación de ultrasonido en combinación de deshidratación osmótica, aumenta la difusividad del agua y

reducen los tiempos de deshidratación por aire convectivo, en piñas frescas [10].

Otros ejemplos lo constituyen la aplicación de campos eléctricos [11] y vacío [12], combinados con deshidratación osmótica, para la posterior deshidratación por aire caliente, en alimentos vegetales. En cuanto a los tratamientos químicos es importante destacar la utilización de compuestos azufrados [13-14].

La utilización de la deshidratación osmótica como pretratamiento se ha utilizado sobre todo en países en desarrollo [15]. Este proceso se basa en la concentración de productos alimenticios por inmersión en una solución hipertónica [16] lo que produce la salida del agua y otras sustancias solubles desde el alimento, hacia una solución concentrada a través de una membrana natural semipermeable [17- 18].

El proceso de osmosis llega a su término una vez que los potenciales químicos del alimento y la solución llegan al equilibrio.

Este proceso no genera productos estables por si solo en el tiempo, por lo que preferentemente se utiliza como pre-tratamiento de otros procesos como el congelado, pasteurizado y deshidratado entre otros [6].

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue analizar la influencia de la deshidratación osmótica como pre-tratamiento en la deshidratación de manzana verde *Granny Smith*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia Prima

Se utilizaron manzanas variedad *Granny smith* mantenidas en refrigeración (5°C) previamente.

2.2. Preparación de las muestras y tratamiento osmótico

Se utilizaron 3 concentraciones de sólidos diferentes (30, 40 y 50°Brix), según el método sugerido por [19-20], los que han estudiado los fenómenos de deshidratación osmótica en frutas.

Se utilizó sacarosa como soluto y agua destilada para asegurar la ausencia de iones que pudiesen influir experimentalmente [21].

Las muestras se cortaron en forma cilíndrica (2.2 cm de diámetro y 1.3 cm de alto) siguiendo la dirección del eje longitudinal, con una masa promedio de $4.45 \text{ g} \pm 0.02$.

Con fin de poseer mayor cantidad de datos analíticos, la deshidratación osmótica se realizó por inmersión completa durante seis horas, complementando el método planteado por [22], y manteniendo agitación constante a temperatura ambiente. La relación fruta/solución elegida fue $\frac{1}{4}$, previniendo cambios significativos en la concentración de la solución osmótica durante el proceso [21].

En cada experiencia se tomaron muestras a intervalos de 60 minutos, las cuales fueron escurridas, puestas sobre papel absorbente y registrado su peso (PP), ganancia de sólidos solubles (SG) y pérdida de humedad según las siguientes expresiones:

$$PP = \left(\frac{P_0 - P_t}{P_0} \right) * 100 \quad (1)$$

$$SG = PA - PP \quad (2)$$

Donde:

Po = Peso inicial (g).

Pt = Peso al momento de muestrear (g).

SG = Sólidos ganados

PA = Pérdida de agua

PP = Perdida de peso

2.3. Deshidratación con aire caliente

En la figura 1 se muestra la disposición de las muestras de manzana fresca (en adelante llamadas sin pretratamiento SAC), y muestras osmóticamente deshidratadas (en adelante llamadas DOSAC), las que fueron suspendidas en un canastillo sujeto a la balanza. Se trabajó a

velocidad de aire constante de 2.4 m/s y se registró la variación de masa hasta alcanzar una humedad final del 15% en base húmeda por triplicado. Se utilizaron 2 temperaturas de deshidratación (55 y 65 °C) para cada tipo de muestra se estudió la incidencia del pretratamiento osmótico sobre la cinética de deshidratación.

Se determinó el contenido de humedad en base seca (g agua/ g m.s.) para cada tiempo t del proceso.

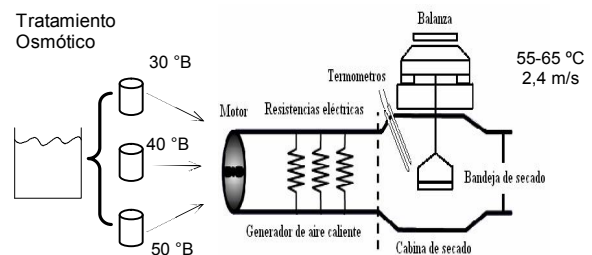


Figura 1. Dispositivo experimental de deshidratación convectiva

Figure 1. Experimental device for convective air drying

En forma complementaria se construyeron las curvas de secado en las que se relaciona la humedad adimensional ($X_{wt}/X_{wo} = MR$) versus tiempo (horas). Estas mismas variables fueron también utilizadas para la construcción de las curvas DO.

Para determinar la difusividad efectiva en SAC y DOSAC se utilizó la ecuación de la 2ª ley de Fick para tiempos largos y geometría de un cilindro finito (ecuación 3).

$$Y = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = \frac{4}{5.783} e^{\left(\frac{-5.783 D_{ef} \cdot t}{r^2} \right)} \quad (3)$$

En la ecuación (4) el cociente corresponde a la fuerza impulsora ó Y, t es el tiempo en segundos, r es el radio del cilindro (m) y D_{ef} es el coeficiente de difusión expresado en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$. La D_{ef} se obtuvo a partir de la linealización de Y en función del tiempo.

$$\left(\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} \right) = Y \quad (4)$$

2.4. Modelamiento

Para modelar la cinética de deshidratación se utilizaron los modelos empíricos de Page, Newton y Handerson-Pabis (ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente), los que han recibido bastante atención en el último tiempo [23-24]. Estos modelos plantean una relación directa entre el contenido de humedad y el tiempo de deshidratación, y están basados en derivaciones de las ecuaciones de difusión de la segunda ley de Fick. Dichos modelos permiten simplificar el estudio del fenómeno bajo las condiciones del proceso [25].

$$\text{Newton} \quad Y = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = e^{(-k_1 t)} \quad (5)$$

$$\text{Page} \quad Y = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = e^{(-k_2 t^n)} \quad (6)$$

$$\text{Henderson-Pabis} \quad Y = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = a e^{(-k_3 t)} \quad (7)$$

La validación de los modelos se realizó mediante pruebas de bondad de ajuste utilizando el coeficiente de determinación R^2 (ecuación 8), el error cuadrático medio (SSE) (ecuación 9) y el estadístico Chi-cuadrado (ecuación 10).

$$R^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_{ci} - \bar{y}_{ei})^2}{(y_{ei} - \bar{y}_{ei})^2} \quad (8)$$

$$SSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_e - Y_c)^2 \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ei} - Y_{ci})^2}{n - z} \quad (10)$$

Con:

n : Número de datos.

Y_e : Fuerza impulsora experimental.

Y_c : Fuerza impulsora calculada.

z : Número de constantes

Adicionalmente, con el fin de recabar mayor información sobre la relación existente entre las variables experimentales, sus interacciones y los parámetros de los modelos propuestos, se realizó

un análisis estadístico multivariante. Su ventaja radica en que permiten evaluar el efecto conjunto del proceso, incluso con datos faltantes o errores [26]. Una opción a este tipo de condiciones son los métodos basados en Proyecciones Latentes [27] [28], que incluyen técnicas como los métodos Multi-Way [29], los que disponen la información en bloques múltiples que contienen los datos en forma matricial. Según [30], este tipo de análisis es una extensión de los modelos factoriales, que aumentan la información y diagnóstico del fenómeno.

Según esto, se plantearon 2 matrices experimentales:

Matriz A: contiene en forma conjunta los datos correspondientes a las variables de la deshidratación osmótica, realizada con las soluciones DO.

Matriz B: contiene en forma conjunta los datos asociados al proceso DOSAC y SAC.

2.5 Análisis estadístico

Para el análisis de comparación de valores medios se utilizó Análisis de la Varianza de dos factores y gráficos HSD de Tukey. Para el análisis multivariante se utilizó el método 3-Way PLS. Todos los cálculos se realizaron mediante Statgraphics Centurion 16 (Statpoint Technologies Inc., 2009) y SIMCA-P+ v12 (Umetrics AB, 2009). El nivel de significancia utilizado fue de $\alpha = 0.05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Se obtuvieron las graficas de la evolución de la DO y la ganancia de sólidos para las 3 condiciones ensayadas (Figura 2). Conforme se incrementó la concentración, mayor fue la pérdida de humedad. Para un mismo tiempo de deshidratación (6 hrs.) se alcanzaron distintos niveles de pérdida de agua, siendo la mayor la correspondiente a 50 °Brix (16.7 %) respecto de 40 y 30 °Brix (12.01 % y 6.13 % respectivamente).

En la etapa inicial del proceso se establecieron los mayores diferenciales de potencial químico entre la fruta y la solución, por consecuencia hubo una mayor pérdida de agua, provocando

que la difusión de las moléculas fuese más rápida.

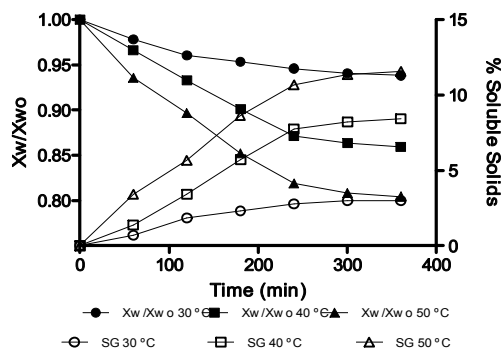


Figura 2. Evolución del contenido de humedad y ganancia de sólidos en muestras de manzana
Figure 2. Evolution of moisture content and solid gain in apple samples

Después de 4 horas la velocidad de transferencia decreció, lo que se puede atribuir a la disminución del gradiente de concentraciones y a los cambios estructurales que se presentan en el tejido. Esto se explica por el hecho de que las células más cercanas a la interfase, están en equilibrio con la solución externa, por lo que las paredes celulares están relajadas y las cavidades celulares impregnadas, mientras que las células internas del tejido, están ligeramente deshidratadas e incluso, inalteradas, reduciéndose la tasa de transferencia de masa [31]. De forma análoga, se observa una dependencia directa entre la ganancia de sólidos solubles y la concentración del medio osmótico. De la Figura 2 se observó una diferencia en la cantidad de soluto que penetró al alimento, lo que se explica por la diferencia de las concentraciones de cada solución. Este comportamiento es análogo a lo reportado en piñas por [32], quien afirma que la ganancia de sólidos es proporcional a la concentración de la disolución (mayor presión osmótica) y tiempo de inmersión.

Posteriormente se determinaron los valores de Difusividad Efectiva (D_{ef}) para cada tratamiento, mediante la integración de la segunda ley de Fick, para tiempos largos y cilindros finitos (Tabla 1). Se observa en general que mayores valores de D_{ef} se relacionan con mayores temperaturas y concentraciones osmóticas.

Tabla 1. Valores promedio de D_{ef} para manzana a diferentes temperaturas y concentraciones osmóticas

Table 1. Average D_{ef} of apple treated at different temperatures and osmotic concentrations

Tratamiento	$D_{ef} \cdot 10^{-9} (m^2 \cdot s^{-1})$	R^2
SAC 55	3.5548	0.983
SAC 65	4.2510	0.955
DOSAC 30-55	3.6420	0.981
DOSAC 40-55	3.8520	0.988
DOSAC 50-55	4.0990	0.993
DOSAC 30-65	5.5844	0.955
DOSAC 40-65	6.5929	0.980
DOSAC 50-65	6.5992	0.982

Esto se debería a la mayor movilidad de las moléculas de agua, al incrementarse la temperatura [33]. En investigaciones análogas se obtuvieron valores comparable: $0.30 - 1.721 \times 10^{-9} m^2/s$ en kiwi [34]; $2.0 - 4.2 \times 10^{-9} m^2/s$ en ajo [35]; $5.59 - 6.51 \times 10^{-9} m^2/s$ en damasco [36].

En la Figura 3 se observan los efectos de las temperaturas y las concentraciones osmóticas sobre D_{ef} evaluados mediante Intervalos HSD de Tukey. Se comprobó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (test de Kolmogorov-Smirnov modificado) y homocedasticidad (test de Levene).

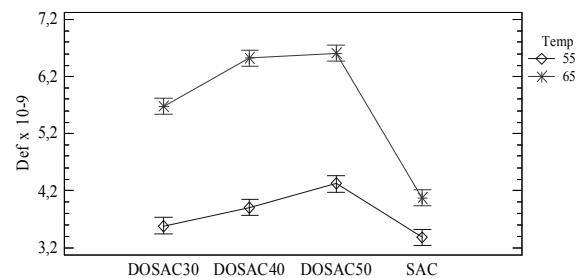


Figura 3. Intervalos HSD de Tukey de los diferentes tratamientos

Figure 3. Tukey HSD Intervals of the different treatments

Se aprecia como las muestras sin pretratamiento a $65^\circ C$ y $55^\circ C$ presentan diferencias significativas entre si. Asimismo, al aumentar la temperatura los valores medios de D_{ef} resultaron significativamente superiores a $65^\circ C$ para todos los casos. Por otro lado, a medida que aumentó la concentración en el pretratamiento de DO se

observaron diferencias significativas a ambas temperaturas, salvo entre DOSAC30 y SAC, a 55°C, y entre DOSAC40 y DOSAC50 a 65°C.

Este comportamiento explica que, si bien la movilidad de las moléculas de agua aumenta con la temperatura, éstas se ven imposibilitadas de salir del alimento debido a que el diámetro de los poros se reduce drásticamente [37]. Esta estabilización de la D_{ef} en torno a altas concentraciones de DO y altas temperaturas ha sido reportado en papaya y pimentón rojo [38,39 y 40].

Por otro lado, el análisis ANOVA indicó que existe una interacción significativa entre el tratamiento osmótico y la temperatura de proceso.

El análisis del proceso combinado (Figuras 4, 5 y 6) muestra que para la misma concentración de agente osmótico usada en la etapa de DO, el aumento de temperatura de 55 a 65°C reduce el tiempo de deshidratación necesario para alcanzar condiciones finales. En el caso de DOSAC30 se puede extrapolar un tiempo de 230 minutos para 65°C y 360 minutos a 55°C. Asimismo para DOSAC40 el tiempo requerido para lograr la humedad final es de 200 minutos 65 °C y 330 minutos a 55°C. Finalmente para DOSAC50 el tiempo requerido es de 180 minutos a 65°C y 270 minutos para 55°C.

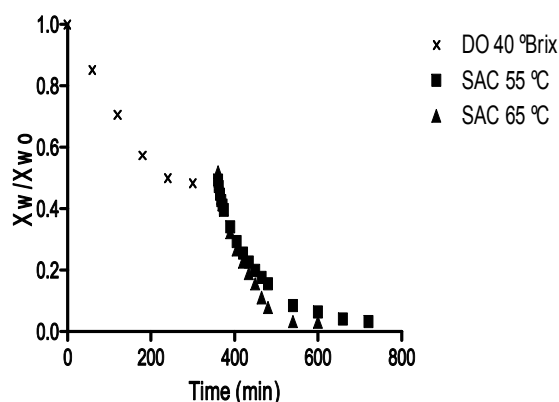


Figura 5. Proceso combinado DOSAC40 a 55 y 65°C
Figure 5. Combined process DOSAC40 by 55 and 65°C

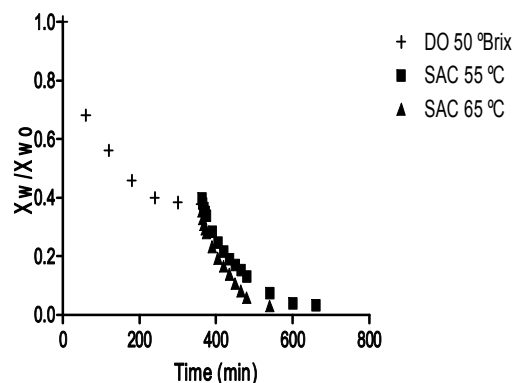


Figura 6. Proceso combinado DOSAC50 a 55 y 65 °C

Figure 6. Combined process DOSAC50 by 55 and 65 °C

Cabe señalar que todas las muestras fueron llevadas a deshidratación por aire caliente luego del pretratamiento de deshidratación osmótica, a fin evitar que se produzca el pseudo-equilibrio de la muestra, es decir, la transferencia de agua desde el ambiente hacia la muestra.

Posteriormente, se ajustaron los datos experimentales utilizando los modelos Newton, Page y Henderson - Pabis.

La validación se realizó mediante pruebas de bondad de ajuste. El rango de variación de los parámetros cinéticos k , y las constantes de cada uno de los modelos ajustados se muestra en la tabla 3. Según lo planteado por [40] un buen ajuste se logra con altos valores del estadístico R^2 (mayores a 0.95), bajos valores de SSE (menores a 0.004) y Chi-cuadrado (menores a 0.004).

Según los resultados, se puede indicar que el mejor ajuste se obtuvo con el modelo de Page, seguido de Newton y Henderson-Pabis. Pese a que el ajuste de los 3 modelos es satisfactorio, se observa una aparente disminución del grado de ajuste conforme se incrementa la temperatura de operación (disminución de R^2 y aumento de SSE y Chi-cuadrado), aunque este comportamiento no alcanza a ser significativo al 95% de confianza.

Para K_1 en el modelo de Newton, se observa su una relación proporcional respecto de la temperatura y la concentración DO.

Tabla 3. Rango de parámetros cinéticos y su validación para los modelos de Newton, Page, Henderson-Pabis (k en s^{-1})

Table 3. Kinetic range parameters and their validation for Newton, Page and Henderson-Pabis models (k expressed in s^{-1})

Modelo	Newton	Page	Henderson-Pabis
$K_1 \times 10^{-4}$	1.430–2.855		
$K_2 \times 10^{-4}$		1.638–8.405	
$K_3 \times 10^{-4}$			1.699–3.150
R^2	0.98–0.99	0.99	0.95–0.99
SSE	0.0001–0.0014	0.0001–0.0303	0.0006–0.0197
$\chi^2 \times 10^{-4}$	1.268–15.229	1.196–8.353	1.120–8.036
n	/	0.86–1.02	/
a	/	/	1.00–1.27

En [41], los autores respecto del modelo de Page plantean la dependencia del parámetro n respecto del tipo de producto a deshidratar y velocidad del aire, pero no de la temperatura. Una situación similar se repite en el parámetro a presente en el modelo de Henderson-Pabis, el cual varía entre 1 y 1.27, indistintamente de la temperatura y concentración de DO.

No obstante, para la constante k_3 , no se apreciaron relaciones respecto de la concentración DO. En efecto, según [42], este modelo puede predecir bien la velocidad de deshidratación al principio del proceso, pero en algunas ocasiones comienza a perder efectividad en las etapas finales de la deshidratación.

Como una manera de clarificar la situación de los diferentes tratamientos, se aplicó un análisis multivariante a las matrices A y B ya definidas. El análisis a la matriz A se realizó mediante el modelo 3-Way PLS de modo de visualizar las relaciones globales entre las variables. El análisis consideró una matriz tridimensional, considerando en la primera dimensión las variables: masa de sólidos secos, humedad, pérdida de agua, pérdida de peso, sólidos ganados y ratio de humedades. La segunda dimensión considero el ordenamiento en función del tiempo de proceso, y como tercera dimensión se considero la concentración de los pretratamientos aplicados (30 °Brix, 40 °Brix y 50 °Brix).

El modelo 3-Way-PLS extrajo 2 factores que explicaron en conjunto el 99.8 % de la varianza total. Asimismo la varianza predictiva explicada

fue del 61.1 %, mientras que la capacidad de predicción global fue de 52.5%. Según [31] estos parámetros aparecen como aceptables para las condiciones de la matriz tratada. El modelo fue validado mediante una rutina completa de validación cruzada (cross-validation), de modo de minimizar la función PRESS (prediction residual sum of squares function) y evitar el sobre ajuste. En la figura 7 se muestran los resultados para los distintos pretratamientos.

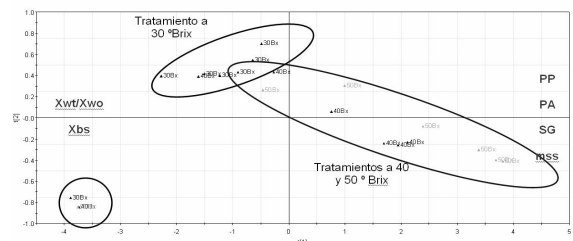


Figura 7. Análisis 3-Way PLS para los tratamientos osmóticos

Figure 7. 3-Way PLS analysis for osmotic pretreatments

Las observaciones se ordenan y discriminan en función de los 3 pretratamientos. En el sector izquierdo se muestran las condiciones iniciales del proceso y tratamiento (altos valores de X_{wt}/X_{bs} y X_{bs}). En la parte superior se presenta el pretratamiento a 30°Brix, el que se comporta homogéneo, diferenciándose claramente respecto de los pretratamientos a 40 y 50°Brix.

Asimismo en el sector derecho se aprecia cómo los 2 pretratamientos a 40 y 50°Brix son los que presentan las mejores condiciones de rendimiento, diferenciándose levemente el pretratamiento a 50°Brix, el que aparece como el que presenta el mejor desempeño en términos de proceso (asociado a altos valores de PP, PA, SG y mss, es decir bajos ratios de X_{wt}/X_{bs} y X_{bs} y por lo tanto mejor desempeño como deshidratación). Finalmente, se realizó el análisis a la matriz B aplicando el modelo 3-Way PLS. El análisis consideró como primera dimensión las variables: $X_{b.s.}$, dX/dt , $X_{b.h.}$, X_w/X_o , Y_{exp} , Y_{cal_N} , Y_{cal_P} e Y_{cal_HP} . Las observaciones se ordenaron en función del tiempo de proceso (segunda dimensión) y como tercera dimensión se considero la naturaleza de los pretratamientos aplicados en conjunto (30 °Brix, 40 °Brix y 50 °Brix; y SAC a 55°C y 65°C). El modelo 3-Way-

PLS extrajo 2 factores que explicaron el 95.6 % de la varianza, mientras que la capacidad de predicción global fue de 72.5%, parámetros aceptables según [31]. Del mismo modo, el modelo fue validado en forma análoga.

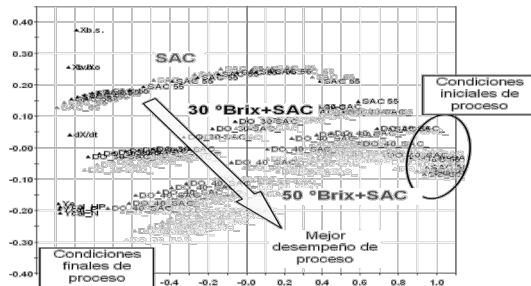


Figura 8. Análisis 3-way PLS para los pretratamientos osmóticos y condiciones de deshidratación

Figure 8. 3-way PLS analysis for the pretreatments and air drying conditions

4. CONCLUSIONES

Se logró determinar que durante el proceso de deshidratación osmótica de manzanas Granny smith el uso de las concentraciones de 30 °Brix, 40 °Brix y 50 °Brix, poseen un efecto significativo sobre la pérdida de humedad, ganancia de sólidos y pérdida de peso, las que dependen del tiempo de inmersión y de la concentración de las soluciones empleadas.

La condición acoplada de la deshidratación por aire caliente a temperaturas de 55 °C y 65 °C presenta una relación positiva en conjunto con la concentración de las soluciones de deshidratación osmótica (interacción), que para las condiciones experimentadas, fueron significativas como factor de proceso. En efecto, la combinación de dichas condiciones se refleja directamente en la variación de los parámetros cinéticos, disminuyendo los tiempos de deshidratación, comportamiento que fue significativo como factor de proceso.

De las experiencias de deshidratación combinada se logró determinar que la mejor condición de proceso fue DOSAC50-65 °C, donde el modelo de Page fue el modelo empírico que mejor ajustó la tasa de deshidratación del producto, bajo las condiciones experimentales ensayadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Perfeccionamiento Académico de la Universidad Tecnológica Metropolitana, por proporcionar apoyo financiero para la publicación de la presente investigación (UTEM Proyecto Interno N ° 291-2006), y a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios Avanzados de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, por el apoyo a través del proyecto DII 037.205/2008.

REFERENCIAS

- [1] GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9 (1) 129-137, 2008.
- [2] MANDALA, I.; ANAGNOSTARAS E.; OIKONOMOU, C. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics, *J.Food Engineering.*, 69 (3), 307-316, 2005.
- [3] KOLAWOLE, O. & ABBO, E. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. *J. Food Engineering*, 79 (2) 724-730, 2007.
- [4] BARAT, J.; GRAU, A.; FITO, P. Deshidratación osmótica de alimentos. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad politécnica de Valencia. Servicio de publicaciones SPUPV- 98.4001.
- [5] GARCÍA-REVERTER, J. Deshidratación de vegetales por aire caliente: Efecto de la concentración y porosidad en el deshidratación de coliflor (*Brassica oleracea*). [Tesis doctoral] 1996.
- [6] KIDMOSE, U., EDELENBOS, M., NØRBÆK, R. AND CHRISTENSEN, L. Colour stability in vegetables. In: *Colour in food: Improving quality*, Douglas B. MacDougall (Ed.) CRC Press, Boca Raton, USA.

- [7] LIN, T.; DURANCE, T.; SCAMAN, C. Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31 (2), 111-117, 1998.
- [8] QUINTERO-RAMOS, A.; BOURNE, M.; ANDALUZA-MORALES, A. Texture and rehydration of dehydrated carrots affected by low temperature blanching. *Journal of Food Engineering*, 57 (5) 127-1128, 1992.
- [9] CANET, W.; GIL, M.; ALIQUÉ, R.; ALONSO, J. Efecto de diferentes escaldados en la textura y contenido de ácido ascórbico de coles de bruselas congeladas. *Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 31 (1), 46-55, 1991.
- [10] FERNANDES, F.; LINHARES, F.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15 (6), 1049-1054, 2008.
- [11] ADE-OMOWAYE, B.; RASTOGI, N.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper. *J. Food Engineering*, 60 (1), 89-98, 2003.
- [12] YUNG, D.; YANYUN, Z. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). *J. Food Engineering*, 85 (1) 84-93, 2008.
- [13] ROBERTS, A.; MCWEENY, D. The uses of dioxide in the food industry. *J. Food Technology*, 7, 221-238, 1972.
- [14] AGUILERA, J.; OPPERMANN, K.; SANCHEZ, F. Kinetics of browning of sultana grapes. *J. Food Science*, 52 (4), 990-993, 1987.
- [15] GENINA SOTO, P. Deshidratación osmótica: alternativa para conservación de frutas tropicales. *Revista Avance y Perspectiva*, 21, 321 – 324, 2002.
- [16] BARBOSA-CANOVAS, G.; VEGA-MERCADO, H. Dehydration of Food. *J. Food Engineering*, 16 (2), 265-288, 1996.
- [17] ARGAIZ, A. Alternativas de proceso para frutos tropicales. *Memorias de simposio nacional de fisiología de productos hortícolas en México*. Ed. Limusa, (8-10), 153-163, 1988.
- [18] HOUGH, G.; CHIRIFE, J.; MARINI, C. A simple model for Osmotic dehydration of apples. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technology*, 26 (2), 151-156, 1993.
- [19] GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, P.; CHIRALT, A. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *J. Food Engineering*, 58 (1), 33-43, 2003.
- [20] LOMBARD, G.; OLIVEIRA, J.; FITO, P.; ANDRE'S, A. Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *J. Food Engineering*, 85 (2), 277-284, 2008.
- [21] GENINA-SOTO, P., ALTAMIRANO-MORALES, S. Deshidratación osmótica de prismas de camote, manzana y papa. *Interciencia*, 30 (8), 485-487, 2005.
- [22] MOREIRA, R. & SERENO, A. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *J. Food Engineering*, 57 (1), 25-31, 2003.
- [23] VALERA, A.; ZAMBRANO, J.; MATERANO, W.; QUINTERO, I. Efectos de la concentración de soluto y la relación fruta/jarabe sobre la deshidratación osmótica de mango en cilindros (*Mangifera indica*). *Agronomía Tropical*, 55 (1), 117-132, 2005.
- [24] MADHIYANON, T.; PHILA, A.; SOPONRONNARIT, S. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29 (14-15), 2849-2854, 2009.
- [25] DOYMAZ, I. Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *J. Food Engineering*, 78 (2), 591-596, 2007.

- [26] MASON, R. AND YOUNG, J., *Multivariate Statistical Process Control with Industrial Application*, ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability 9, Society for Industrial Mathematics; 1st ed., 2001.
- [27] BRO, R., VAN DEN BERG, F., THYBO, A., ANDERSEN, C. JØRGENSEN, B. AND ANDERSEN, H., *Multivariate data analysis as a tool in advanced quality monitoring in the food production chain*. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 235-244, 2002.
- [28] QIN, S., *Statistical process monitoring: basics and beyond*, *Journal of Chemometrics*, 17, 480-502, 2003.
- [29] KRONENBERG, P. *Applied Multiway Data Analysis*. Wiley-Interscience. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2008.
- [30] FERRER, A. *Multivariate Statistical Process Control based on Principal Components Analysis (MSPC-PCA): Some reflections and a case study in an autobody assembly process*, *Quality Engineering*, 19, 311-325, 2007.
- [31] CHIRALT, A.; TALENS, P. *Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues*, *J. Food Engineering*, 67 (1-2), 167-177, 2005.
- [32] SAPTURA, D. *Osmotic dehydration of pineapple*. *Drying Technology*, 19(2), 415-425, 2001.
- [33] TELLO-PANDURO B., GARCÍA-VÁSQUEZ Y., MEDINA-VIVANCO M. AND MENDIETA-TABOADA O. *Air drying of clams (anodontites trapesialis) and tilapia (oreochromis niloticus) fillet*. *Drying Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, 22-25, C, 1977-1983, August 2004*.
- [34] SIMAL, S.; FEMENIA, A.; LLULL, P.; ROSELLÓ, C. *Use of exponential Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit*, *J. Food Engineering*, 66 (3), 323-328, 2005.
- [35] MADAMBA, P.; DRICOLL, R.H.; BUCKLE K.A. *Thin Layer drying characteristics of garlic slices*, *J. Food Engineering*, 29 (1), 75-97, 1996.
- [36] TOGRUL, I.; PEHLIVAN, D. *Modeling of thin layer drying kinetics of some fruit under open air sun drying process*, *J. Food Engineering* 65 (3) 413-425, 2004.
- [37] RAOULT-WACK, A. *Recent advances in the osmotic dehydration of foods*. *Trends in Food Science and Technology*, 5, 255-260, 1994.
- [38] EL-AOUAR, A.; AZOUBEL, P.M.; MURR, E.X. *Drying Kinetics of fresh and osmotically pretreated papaya (Carica papaya L.)*, *J. Food Engineering* 59 (1), 85-91, 2003.
- [39] VEGA, A.; ANDRÉS, A.; FITO, P. *Modelado de la Cinética de secado y deshidratación del pimiento rojo (Capsicum annum L. Cv Lamuyo)* *Información Tecnológica*, 16 (6), 3-11, 2005.
- [40] VEGA, A.; FITO, P.; ANDRÉS, A.; LEMUS, R. *Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo)*, *J. Food Engineering*, 79 (4), 1460-1466, 2007.
- [41] BABALIS, S & BELESSIOTIS, V.: *Influence of the drying conditions on the drying constant moisture diffusivity during the thin-layer of figs*, *J. Food Engineering*, 65 (3), 449-458, 2004.
- [42] DISSA, A.; DESMORIEUX, J.; BATHIEBO, J.; KOULIDIATI, J. *Convective drying characteristics of Amelie mango (Mangifera Indica L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage*, *J. Food Engineering*, 88 (4), 429-437, 2008.