

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE DESHIDRATACION OSMOTICA DE CALABACITA EN SOLUCIONES TERNARIAS

OPTIMIZATION OF OSMOTIC DEHYDRATION PROCESS OF PUMPKIN IN TERNARY SOLUTIONS

Ruth R. Bambicha¹, Miriam E. Agnelli¹, Rodolfo H. Mascheroni^{1,2*}

(1) Universidad Nacional de La Plata, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CONICET La Plata - UNLP), 47 y 116, (B1900AJJ) La Plata - Argentina

(2) Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, MODIAL, 115 e/ 47 y 48, (B1900AJJ) La Plata - Argentina.

*autor de contacto (e-mail: rhmasche@ing.unlp.edu.ar)

Recibido: 11/03/2011 - Evaluado: 19/04/2011 - Aceptado: 29/06/2011

RESUMEN

Mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (MSR), se determinaron las condiciones óptimas para lograr una máxima pérdida de agua (WL) y reducción de peso (WR) y una mínima ganancia de sólidos (SG), contenido de humedad normalizada (NMC) y cambio de color (CC) de la deshidratación osmótica (DO) de calabacita (*Cucurbita Moschata*) en soluciones ternarias (agua/sacarosa/cloruro de sodio) realizada en 32 ejecuciones (n), establecidas por un diseño de composición Central 2³ que evaluó los efectos de los factores: concentración de sacarosa (40, 50 y 60 °Brix), concentración de cloruro de sodio (3, 6 y 9 g/100g) y tiempo de ensayo (1, 2 y 3 h). El modelo propuesto tuvo una buena correlación con los datos experimentales ($p > 0.05$). Las condiciones óptimas obtenidas para el proceso de deshidratación osmótica fueron: 60° Brix + 6.39%, concentraciones de sacarosa y sal respectivamente, y un tiempo de proceso de 2 h y 24 min.

ABSTRACT

By applying the methodology of response surface analysis (RSM) optimum conditions were determined for maximum WL (water loss) and WR (weight reduction), and minimal SG (solute gain), NMC (normalized moisture content) and change of color (CC) for the osmotic dehydration (OD) of pumpkin (*Cucurbita Moschata*) in ternary solutions (water/sucrose/sodium chloride) carried out in 32 executions (n) by application of a Face-Centered Central Composite Design (CCF) that evaluated the effect of experimental factors: sucrose concentration (40, 50 and 60 °Brix), sodium chloride concentration (3, 6 and 9 g/100g) and length of test (1, 2 and 3 h). The proposed model gave a good correlation of the experimental data ($p > 0.05$). Optimal conditions for the OD process were: 60° Brix + 6.39%, concentrations of sucrose and salt, respectively, and 2 h, 24 min. treatment time.

Palabras claves: calabacita; soluciones ternarias; deshidratación osmótica; optimización
Keywords: pumpkin; ternary solutions; osmotic dehydration; optimization

INTRODUCCION

La calabacita pertenece a la familia clasificada como Cucurbitaceae y género *Moschata*, es un producto de alto consumo, de bajo costo y fácil de almacenar y procesar. Es una buena fuente de nutrientes como K^+ , provitamina A, carotenoides, principalmente carotenos A y B, vitaminas B_2 , C y E y de alto contenido de fibras (Dutta *et al.*, 2006; De Escalada Pla *et al.*, 2007).

La calabacita fresca es muy sensible al deterioro microbiano, incluso en condiciones de refrigeración (Doymaz, 2007), para lo cual la introducción de la deshidratación osmótica (DO) como una etapa intermedia dentro de un programa de secado conduciría a la extensión de la vida útil de vegetales y frutas y reducción de los tiempos de procesado total, como método novedoso de preservación (Shi & Le Maguer, 2002) y mejoraría además las características organolépticas y nutricionales del producto final, logrando satisfacer de este modo la demanda del consumidor por frutas procesadas con características sensoriales semejantes al producto fresco. La calabacita osmodeshidratada podría ser utilizada en ensaladas, snacks, en preparación de sopas, jugos y alimentos azucarados.

La DO consiste en la inmersión de un alimento sólido (entero o en trozos) por un cierto periodo de tiempo en una solución hipertónica, provocando la remoción del contenido de agua, con aumento simultáneo de sólidos por efecto de la presión osmótica, de modo que permite obtener productos con un contenido de humedad relativamente alto (20-50%), clasificado como alimento de humedad intermedia (Raoult-Wack *et al.*, 1991).

El proceso osmótico es afectado por las propiedades fisicoquímicas de los solutos empleados debido a que la eficiencia de la deshidratación es posiblemente afectada por el peso molecular, estado iónico y solubilidad del soluto en el agua (Rahman & Perera, 2007). La selección del soluto podría ser considerada de acuerdo a los siguientes factores: (i) el impacto del soluto sobre las características sensoriales del producto, (ii) el costo relativo del soluto en relación al valor final del producto, y (iii) el peso molecular del soluto. Algunos de los solutos mayormente utilizados son cloruro de sodio, sacarosa, glucosa y jarabe de maíz (Bekele & Ramaswamy, 2010).

Se ha demostrado que la velocidad de penetración de agentes osmóticos es directamente proporcional a la concentración de la solución e inversamente proporcional al tamaño del soluto empleado (Panagiotou *et al.*, 1999; Giraldo *et al.*, 2003). Lenart y Flink (1984), encontraron que el empleo de la mezcla de sacarosa y cloruro de sodio provoca una gran disminución en la actividad acuosa del producto, aunque la velocidad de transferencia de agua sea similar comparada con la utilización de solución de sacarosa pura. La utilización de soluciones ternarias (sacarosa/cloruro de sodio/agua) también ha sido reportada por Singh *et al.* (2007), Alves *et al.* (2005) y Sacchetti *et al.* (2001); donde confirman la capacidad de los agentes osmóticos para provocar una disminución del valor de la actividad acuosa del producto osmodeshidratado.

Pese a numerosos estudios realizados sobre la influencia de variables sobre el proceso de DO, resulta dificultoso establecer una regla general para los mismos, por ello es necesario identificar las condiciones óptimas operacionales que incrementen la velocidad de transferencia de masa sin afectar significativamente la calidad del producto osmodeshidratado (Eren & Kaymak-Ertekin, 2007), tal como es establecido por Mayor *et al.* (2006), respecto a la cinética de deshidratación de calabacita en sistemas ternarios, quienes sostienen que los cambios más importantes en la transferencia de masa ocurren durante las 3 (tres) primeras horas de proceso, rango de tiempo recomendado para alcanzar la composición deseada del producto deshidratado. A igual conclusión arribó Lazarides (1994), que trabajó con manzanas deshidratadas en soluciones concentradas (45° y 65° Brix) durante 3 horas, demostrando una pérdida de agua (incremento del 30%) y un aumento en la ganancia de sólidos (aumento del 80%) respecto a la solución menos concentrada a igual tiempo de DO. Contrariamente, el empleo de soluciones poco concentradas de sacarosa provoca una mínima pérdida de agua y de ganancia de sólidos (Karathanos *et al.*, 1995).

La metodología de análisis de Superficie de Respuesta (MSR) es una importante herramienta utilizada en el desarrollo de procesos y productos. La MSR ha sido empleada con gran efectividad en investigaciones a nivel industrial en el desarrollo de nuevas formulaciones, debido a la utilidad que ofrece este grupo de técnicas empíricas que permiten relacionar una o varias respuestas, como índice de color o viscosidad, con una serie de variables control, tales como tiempo, temperatura y presión (Box *et al.*, 2005).

En la literatura científica hay registro de numerosos trabajos que utilizan esta metodología de análisis experimental; Corzo y Gómez (2004), trabajaron en la optimización de la deshidratación osmótica de cilindros de melón; Souza *et al.* (2007), optimizaron el procedimiento de DO seguido de una técnica de secado por aire, pudiendo reducir el tiempo total del proceso de secado de tomates, a su vez Fernandes *et al.* (2006), encontraron las condiciones óptimas del proceso de secado de bananas. Singh *et al.* (2010), trabajaron en la optimización de la deshidratación de rodajas de zanahorias en soluciones ternarias al igual que Eren y Kaymak-Ertekin (2007), que estudiaron la deshidratación de papas en soluciones compuestas por sacarosa y sal.

El objetivo del presente trabajo fue determinar las condiciones óptimas de la deshidratación osmótica de discos de calabacita (*Cucurbita Moschata*) en soluciones ternarias (agua/ sacarosa / cloruro de sodio) mediante la metodología de superficie de respuesta, evaluando los efectos de la concentración de la solución osmótica y tiempo de ensayo.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Se emplearon calabacitas (*Cucurbita Moschata*) compradas en un mercado local, las cuales fueron almacenadas a 5° C y a una humedad relativa de 80-90% hasta la realización de los experimentos. Antes de su utilización fueron lavadas, peladas y cortadas en discos de 30 mm de diámetro y 10 mm de altura, con empleo de un sacabocados (Figura 1).

La solución osmótica ternaria (sacarosa/ sal/ agua) utilizada en cada corrida experimental fue preparada mezclando cantidades necesarias de sacarosa (40, 50 y 60 g/100g solución) y cloruro de sodio (3, 6 y 9 g/100g), ambos de grado comercial, con adición apropiada de agua destilada de acuerdo al diseño experimental utilizado.



Fig. 1: Discos de calabacita frescos (30 x10 mm)

Deshidratación Osmótica

Para efectuar la DO, se pesó 150 g de discos de calabacita que fueron colocados en una canasta de malla plástica. Luego se sumergió el sistema en la solución deshidratante contenida en un vaso de precipitado plástico, que posteriormente se ubicó en un shaker termostatzado (Modelo TT 400, marca: FERCA) con agitación constante de 100 ciclos/min. La relación peso calabacita/ solución utilizada fue 1:10 para mantener constante la concentración

de la solución osmótica durante el proceso de deshidratación. La DO se efectuó a 30°C durante 1, 2 y 3 horas. Transcurrido el tiempo de deshidratación, se escurrió los discos de calabacita en papel secante dispuesto en bandejas de plástico, posteriormente se pesó los discos contenidos en la canasta. La determinación de sólidos solubles y contenido de humedad se realizó en muestras frescas y tratadas osmóticamente.

Los experimentos fueron asignados al azar a fin de minimizar los efectos de la variabilidad no explicada en las respuestas observadas debido a factores externos. Todos los experimentos se realizaron por triplicado y el valor medio fue tomado para el cálculo.

Los contenidos de humedad y sólidos fueron evaluados en discos de calabacitas frescas y osmodeshidratadas (AOAC, 1995). Para la evaluación del intercambio de masa entre la solución y de la muestra durante la deshidratación osmótica, se utilizaron los parámetros: pérdida de agua (PA), ganancia de sólidos (GS), la reducción de peso (RP) y contenido de humedad normalizado (CHN) que fueron calculados de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$PA (\%) = (m_i z_i - m_f z_f) / m_i \times 100 \quad (\text{g} / 100 \text{ g muestra fresca}) \quad (1)$$

$$GS (\%) = (m_i s_i - m_f s_f) / m_i \times 100 \quad (\text{g} / 100 \text{ g muestra fresca}) \quad (2)$$

$$RP (\%) = (m_i - m_f) / m_i \times 100 \quad (\text{g} / 100 \text{ g muestra fresca}) \quad (3)$$

$$CHN = (M_0 - M_{bh}) / (M_0 - M_e) \quad (4)$$

Donde m_i y m_f son los respectivos pesos (g) de las muestras iniciales y finales; z_i y z_f son las fracciones inicial y final del agua (g agua/ g muestra) contenidos en la muestra, s_i y s_f son las fracciones iniciales y finales correspondientes sólidos totales presentes en la muestra; M_0 es el contenido inicial de humedad (g agua / g sólido seco), M_{bh} es el contenido final de humedad (g agua / g de sólidos secos); M_e es el contenido de humedad de equilibrio (g agua / g de sólidos secos).

Determinaciones Analíticas

El contenido de humedad fue determinado por secado en estufa de vacío (70°C a 100 mm Hg) hasta peso constante (AOAC, 1995).

El contenido de sólidos solubles fue determinado por medición de °Brix a 20 °C (refractómetro Bellingham – Stanley Limited).

Para la determinación de color se midieron las coordenadas del sistema Cie–Lab (C.I.E., 1986): L^* : luminosidad; a^* : enrojecimiento y b^* : amarillamiento, empleando el colorímetro Minolta modelo CR300 color. Para la calibración del instrumento, se utilizó el patrón blanco que provee el equipo: $L^*= 97.59$, $a^*=-0.04$ y $b^*=1.70$.

A cada muestra de calabacita se le efectuaron 4 mediciones de color en la superficie (superior e inferior), informándose el promedio. Los datos fueron utilizados para determinar el cambio de color (ΔE), que se determinó mediante la Ec. 5:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (5)$$

Diseño experimental y análisis estadístico

Las condiciones óptimas para la deshidratación osmótica de calabaza en soluciones ternarias, se establecieron por aplicación de un Diseño de Composición Central (DCC) compuesto por 4 (cuatro) replicados del punto central que estudió el efecto de los factores experimentales (concentración de sacarosa y la concentración de

cloruro de sodio, tiempo de ensayo) en 3 (tres) niveles, en 32 ejecuciones (n) bajo la metodología de análisis de superficie de respuesta (RSM).

Los niveles utilizados para cada experimento fueron designados como -1, 0, +1. Los valores de las variables independientes codificadas y no codificadas se exhiben en la Tabla 1. Para cada respuesta se desarrolló un modelo polinomial de segundo orden, utilizando regresión lineal múltiple. El diseño experimental junto con los valores de las respuestas analizadas se expone en la Tabla 2.

Tabla 1: Niveles de las variables del proceso en forma codificada y sin codificar

Niveles Codificados	Niveles sin codificar		
	Concentración de Sacarosa (°Brix) (X ₁)	Concentración de NaCl (%) (X ₂)	Tiempo (h) (X ₃)
-1	40	3	1
0	50	6	2
+1	60	9	3

El modelo propuesto para cada respuesta se describió mediante el ajuste de los datos experimentales a la siguiente ecuación polinomial de segundo orden (ec. 6):

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{12}X_1X_2 + B_{23}X_2X_3 + B_{13}X_1X_3 \quad (6)$$

donde sólo se consideró la influencia de los factores significativos ($p < 0.05$). Y representa la respuesta experimental o variable dependiente ($Y_1 =$ pérdida de agua (g) / 100g calabacita fresca, $Y_2 =$ ganancia de sólidos (g) / 100 g calabacita fresca, $Y_3 =$ reducción de peso (g) / 100 g calabacita fresca, $Y_4 =$ contenido de humedad normalizada e $Y_5 =$ cambio de color); X representa las variables independientes codificadas del proceso de deshidratación ($X_1 =$ concentración de sacarosa, $X_2 =$ concentración de NaCl y $X_3 =$ tiempo de deshidratación empleado); B_0 representa la razón o el valor de la respuesta ajustado en el punto central y B_i , B_{ii} , y B_{ij} representan los coeficientes de regresión lineal, cuadrático y de las interacciones, respectivamente. Un alto valor absoluto para los coeficientes B_i , podría indicar una importante contribución de X_i sobre la predicción de Y_n ; efecto contrario se observa para los pequeños valores absolutos de B_i .

El análisis de regresión de los datos experimentales fue realizado para observar la significancia de los efectos de las variables del proceso (X_i) sobre las respuestas analizadas (Y_n) y se ejecutó mediante el empleo del software STATGRAPHICS Plus 5.1 (Manugistics Inc., USA), utilizado además para la optimización de las variables del proceso. Para la generación de mapas de superficie de respuesta se empleó el programa Matlab 7.0 (Mathworks Inc., USA), donde los gráficos o contornos de superficie fueron graficados como Y en función de 2 factores (X_a , X_b) manteniendo el tercer factor (X_c) en un valor medio.

El cálculo de las condiciones óptimas para el proceso de deshidratación osmótica de los discos de calabacita, fue realizado usando un método de respuesta múltiple llamado conveniencia, el cual combina todas las respuestas en una sola medida.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/m} \quad (7)$$

donde $d_{i..n}$ son los índices de conveniencia para cada respuesta ($d_i=0$, menos aceptable; $d_i=1$, más aceptable), y m es la importancia relativa de cada respuesta. Luego se aplica un algoritmo matemático a la función D para determinar los valores de las variables que maximizan dicha función (Ferreira *et al.*, 2007; Eren & Kaymak-Ertekin, 2007).

Se aplicó el método de la función de conveniencia del programa STATGRAPHICS Plus 5.1 (*desirability function*), para encontrar las condiciones óptimas de procesamiento.

Tabla 2: Diseño experimental codificado para las variables del proceso y datos experimentales para la optimización del proceso de deshidratación osmótica

Tratamientos	Factores evaluados			Valores obtenidos para las variables respuesta				
	Sacarosa (°Brix) X_1	Sal (g/100g) X_2	Tiempo (h) X_3	P.A. (%)	G.S. (%)	R.P. (%)	C.H.N.	C.C.
1	1	-1	1	39,7	8,0	35,662	0,861	2,609
2	-1	0	0	40,8	8,2	38,177	0,807	2,973
3	1	1	-1	38,7	8,0	32,883	0,873	2,279
4	0	0	1	44	11,1	36,814	0,792	1,642
5	-1	1	1	49,7	13,0	41,674	0,748	4,374
6	-1	1	-1	30,9	9,0	24,853	0,864	1,588
7	-1	-1	1	35,1	10,7	28,544	0,825	3,182
8	-1	-1	-1	21,3	6,6	17,119	0,907	1,273
9	0	-1	0	28,9	7,7	24,165	0,872	2,232
10	0	0	0	45,1	12,6	36,406	0,777	2,772
11	0	0	0	46,9	12,4	38,628	0,769	2,888
12	0	1	0	47,0	12,9	39,647	0,765	2,168
13	0	0	1	47,0	14,7	36,239	0,751	2,854
14	1	-1	-1	25,9	5,9	22,464	0,909	3,766
15	1	0	0	47,3	9,5	41,554	0,851	2,711
16	1	1	1	62,5	11,1	54,902	0,737	8,228
17	1	-1	1	40,4	8,6	35,691	0,849	2,509
18	-1	0	0	40,5	8,3	37,867	0,808	2,709
19	1	1	-1	43,3	8,5	37,229	0,856	2,581
20	0	0	-1	44,7	10,7	38,075	0,814	1,654
21	-1	1	1	48,4	13,4	39,669	0,750	4,562
22	-1	1	-1	32,8	8,3	27,829	0,871	1,879
23	-1	-1	1	33,1	10,5	26,434	0,834	4,408
24	-1	-1	-1	22,7	7,0	18,375	0,901	1,787
25	0	-1	0	29,5	7,9	24,682	0,921	2,008
26	0	0	0	46,0	12,5	37,517	0,773	2,292
27	0	0	0	46,5	12,3	38,201	0,767	2,772
28	0	1	0	49,4	12,8	42,498	0,806	2,663
29	0	0	1	49,1	14,2	39,138	0,726	2,922
30	1	-1	-1	29,4	6,0	26,331	0,914	3,911
31	1	0	0	54,5	6,5	52,757	0,822	2,901
32	1	1	1	64,1	12,5	55,194	0,703	7,914

RESULTADOS Y DISCUSION

Ajuste de modelos y análisis de los mapas de contorno

En la Tabla 3 se muestran todas aquellas variables que resultaron significativas ($p < 0.05$) para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y reducción de peso.

El análisis de regresión lineal para el modelo cuadrático ajustado pudo explicar un 93%, 88% y 86% de la variabilidad observada en los datos experimentales obtenidos para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y reducción de peso respectivamente.

La Tabla 4 muestran los coeficientes de regresión (constantes, lineales, cuadráticos e interacciones) de los modelos matemáticos usados para predecir la pérdida de agua y reducción de peso.

Tabla 3: Tabla ANOVA, variables lineales, cuadráticas e interacciones de cada respuesta

Fuente	g. l.	(Y ₁) Pérdida de Agua (P. A.)			(Y ₂) Ganancia de sólidos (G. S.)			(Y ₃) Reducción de Peso (R. P.)		
		Suma de cuadrados	F	P-valor	Suma de cuadrados	F	P-valor	Suma de cuadrados	F	P-valor
X ₁ [Sac]	1	409,512	469,36	0,0021	5,408	270,4	0,0037	442,609	327,55	0,003
X ₂ [NaCl]	1	1292,83	1481,76	0,0007	46,818	2340,9	0,0004	937,779	693,99	0,0014
X ₃ (Tpo)	1	916,658	1050,61	0,001	63,368	3168,4	0,0003	617,549	457,01	0,0022
X ₁ X ₁	1				50,5582	2527,91	0,0004	30,6053	22,65	0,0414
X ₁ X ₂	1	34,81	39,9	0,0242	0,455625	22,78	0,0412			
X ₁ X ₃	1				1,5006	75,03	0,0131			
X ₂ X ₂	1	409,96	469,87	0,0021	4,23824	211,91	0,0047	335,01	247,92	0,004
X ₂ X ₃	1	56,25	64,47	0,0152	0,950625		0,0204	44,3656	32,83	0,0291
X ₃ X ₃	1				11,1387		0,0018			
Bloques	1	17,405	19,95	0,0466	0,06125		0,2222	24,1443	17,87	0,0517
Falta de ajuste	19	9,64	184,962	0,0981	44,85	17,0424	0,022	10,17	302,439	0,0932
rrror	2	1,745			0,04			2,70257		
Total	31	3324,14			208,239			2718,18		
R ²		0,9438			0,9179			0,8877		
R ² ajustado		0,9341			0,8844			0,8608		

Las celdas de color gris indican resultados No significativos a un nivel de confianza del 95%

Tabla 4: Tabla de coeficientes para predicción de modelos de P.A. (%) y R.P. (%)

Coefficientes	PA (%)	RP (%)
β ₀	46,033	38,520
β ₁	4,525	4,704
β ₂	8,04	6,848
β ₃	6,77	5,557
β ₁₁		2,284
β ₂₂	-7,393	-7,557
β ₃₃		
β ₁₂	1,475	
β ₁₃		
β ₂₃	1,875	1,665

Las celdas de color gris indican resultados No significativos a un nivel de confianza del 95%

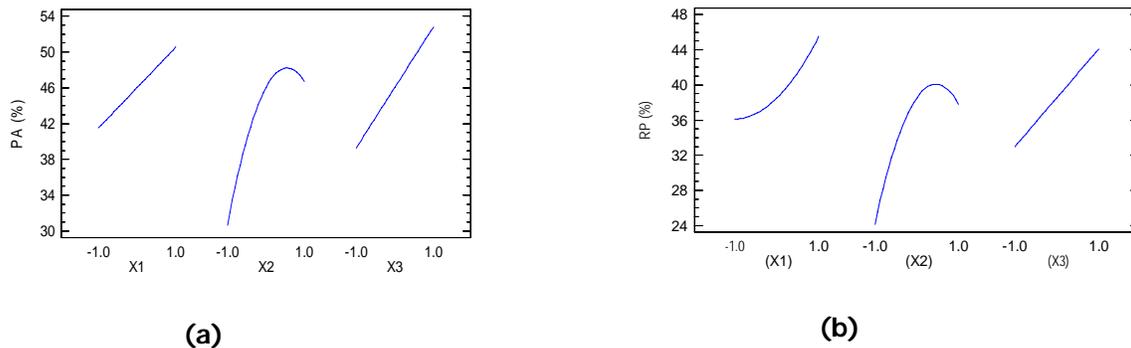
Se obtuvo un buen ajuste de los datos experimentales para pérdida de agua y reducción de peso a una ecuación polinomial de segundo grado ($p > 0,05$), que predice adecuadamente estas variables de proceso.

Los modelos que relacionan las variables de proceso evaluadas con la P.A. y R.P. son representados por las ecuaciones 8 y 9:

$$(Y_1) = \text{Pérdida de agua g / 100 g de calabacita fresca} \quad (8)$$
$$= 46,033 + 4,525 * X_1 + 8,040 * X_2 + 6,770 * X_3 + 1,475 * X_1 X_2 - 7,393 * X_2^2 + 1,875 * X_2 X_3$$

$$(Y_3) = \text{Reducción de peso g / 100g de calabacita fresca} \quad (9)$$
$$= 38,519 + 4,704 * X_1 + 6,847 * X_2 + 5,556 * X_3 + 2,284 * X_1 X_1 - 7,556 * X_2 X_2 + 1,665 * X_2 X_3$$

El análisis de varianza aplicado a los factores enunciados más arriba, reveló que la totalidad de los términos lineales de las variables del proceso (X_1 , X_2 , X_3) tienen un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre P.A., y R.P., y resultó igualmente significativo para algunos de los términos cuadráticos e interacciones sobre las respuestas evaluadas. En la Figura 2 se muestran los efectos de cada variable independiente sobre las respuestas P.A. y R.P.



Los valores de P.A., en las condiciones del ensayo, variaron desde un 30% a un 54% (p/p). Los factores X_1 y X_3 tuvieron un efecto lineal positivo sobre la P.A., indicando que cuando aumenta la concentración de sacarosa y el tiempo de ensayo empleado, aumenta la pérdida de agua. El factor X_2 , concentración de NaCl, tuvo un efecto cuadrático negativo sobre P.A., indicando que la concentración de sal produce un cierto aumento en la salida de agua. Si se emplea una concentración superior al 6% de sal para deshidratar, dicho aumento provocaría una disminución en la salida de agua desde el tejido vegetal.

Por otro lado, los términos cuadráticos, (sacarosa)², ($X_1 X_1$), y (tiempo de deshidratación)², ($X_3 X_3$), y la interacción sacarosa tiempo, ($X_1 X_2$), no tuvieron un efecto significativo al 5% del nivel de confianza ($p < 0,05$) sobre la pérdida de agua.

Los valores obtenidos para la disminución de peso variaron desde 24% a 45% (p/p). A medida que aumenta el tiempo de deshidratación empleado, (X_3), aumenta la R.P. en el tejido. El factor X_1 afectó positivamente la reducción de peso, pero X_2 , al igual que para la P.A., provocó un aumento en la R.P., luego de cierta concentración de sal añadida a la solución, su efecto es inverso.

A su vez, para la reducción de peso no influyeron significativamente, ($p > 0,05$), las interacciones sacarosa-sal, ($X_1 X_2$), y sacarosa –tiempo, ($X_1 X_3$), ni el término cuadrático (tiempo de deshidratación)², ($X_3 X_3$).

Los coeficientes (β) son magnitudes que indican el grado de influencia de las variables lineales, cuadráticas e interacciones sobre las variables Y evaluadas. Para la respuesta evaluada, pérdida de agua, los valores obtenidos para los coeficientes lineales, X_1 , X_2 e X_3 , fueron: 4,533, 8,042 y 6,775 respectivamente, indicando un incremento en la pérdida de agua cuando aumentan los componentes la solución osmótica, sacarosa y sal, y el tiempo de proceso empleados. Este comportamiento fue observado además por Rastogi y Raghavarao (2004) y Talens *et al.* (2002), quienes afirman que las mayores tasas de de pérdida de agua son obtenidas con la utilización de una alta concentración de solutos en la solución osmótica. Esto es corroborado además por Mayor *et al.* (2007), quienes

demostraron que la P.A. aumenta rápidamente durante las 2 primeras horas de deshidratación empleando soluciones ternarias y que los valores obtenidos para P.A. son significativamente mayores ($p < 0.05$) comparados con los valores obtenidos de P.A. al utilizar solamente solución de sacarosa como agente osmótico.

La Figura 3 indica el efecto del incremento en la variable pérdida de agua en función de los factores: tiempo de deshidratación, concentración de sacarosa y NaCl.

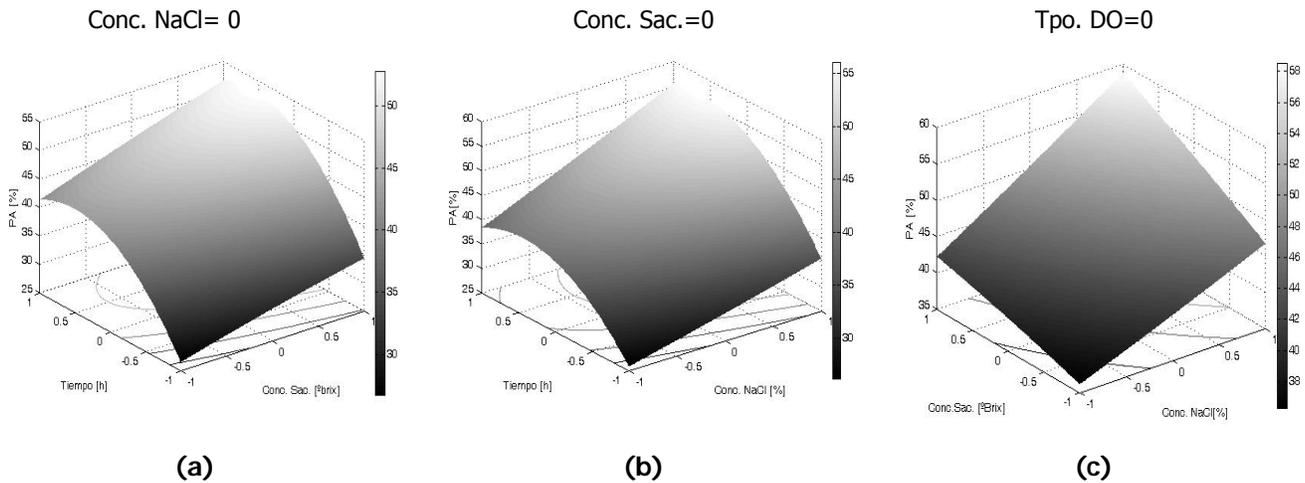


Fig. 3: Efecto del tiempo de proceso y de la concentración de sacarosa y NaCl sobre la pérdida de agua

Los coeficientes (β) obtenidos para pérdida de peso (variable Y_3) indicaron que la mayoría de las variables lineales, cuadráticas e interacciones influyen significativamente ($p < 0,05$) sobre este parámetro. Los valores obtenidos para los coeficientes lineales: X_1 , X_2 e X_3 fueron: 4,7043, 6,8476 y 6,8475 respectivamente, lo que implica un incremento en la reducción de peso cuando aumenta la concentración de la solución osmótica y tiempo de proceso empleados durante la deshidratación. Este aumento en R.P. puede ser observado en la Figura 4.

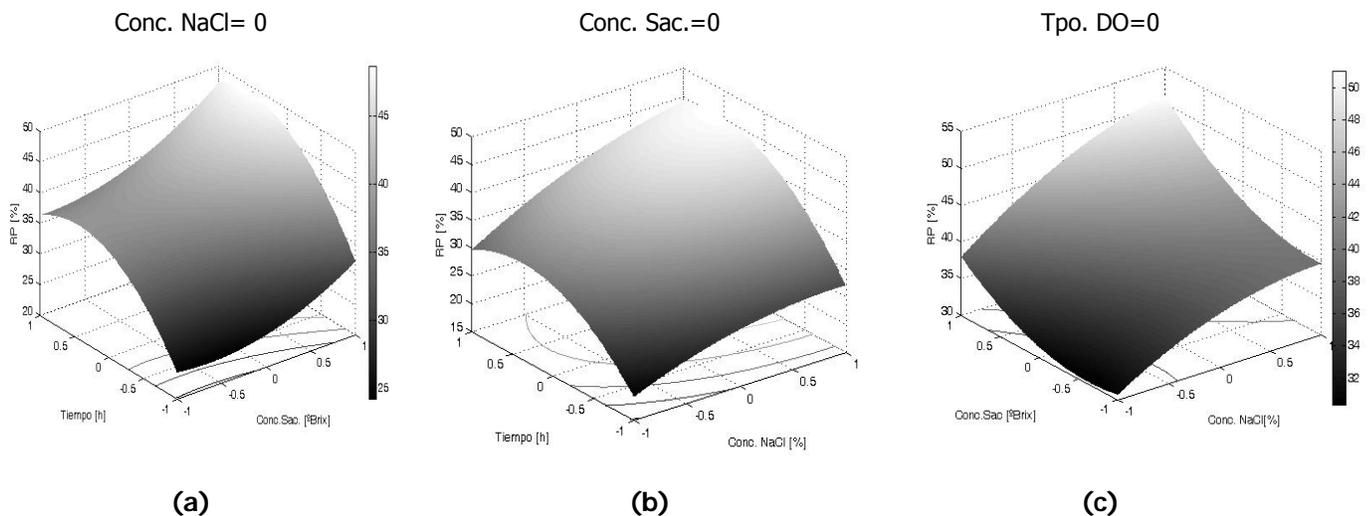


Fig. 4: Efecto del tiempo de proceso y de la concentración de sacarosa y NaCl sobre la reducción de peso

La Figura 5 muestra los efectos de los tres factores estudiados sobre la ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de calabacita en soluciones ternarias.

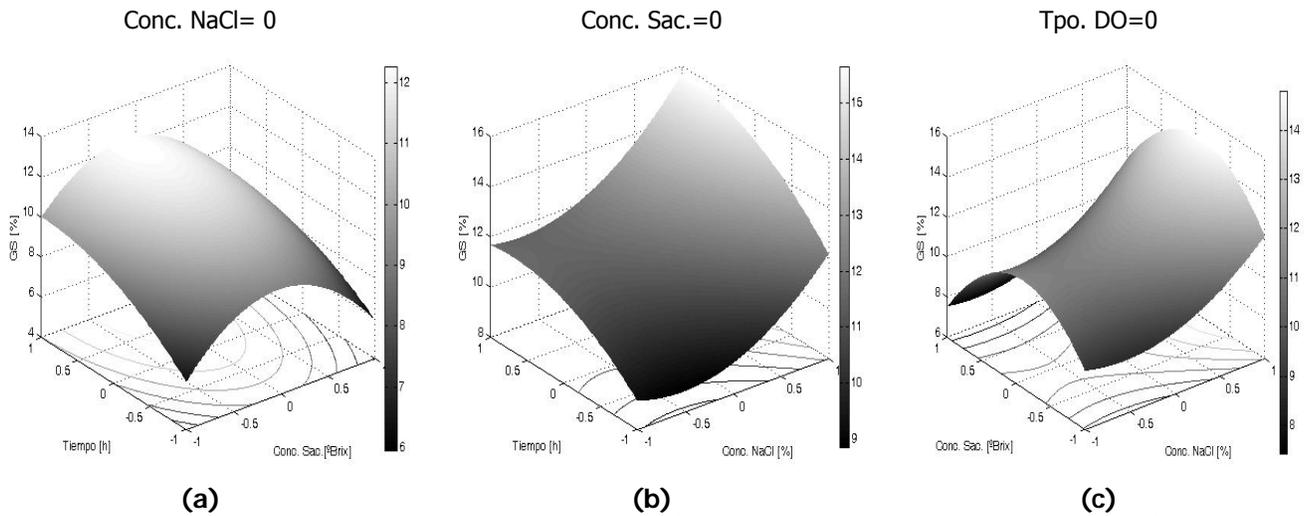


Fig. 5: Efecto del tiempo de proceso y de la concentración de sacarosa y NaCl sobre la ganancia de sólidos

El coeficiente de correlación ajustado (R^2) explica el 88.44% de la variabilidad obtenida para la ganancia de sólidos indicando – además- un buen ajuste entre los valores experimentales y predichos, como se puede observar en la Figura 6.

Los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto presentaron un error absoluto relativo promedio (MARE%) de 6.69%, lo cual sugiere una predicción aceptable para la determinación de ganancia de sólidos.

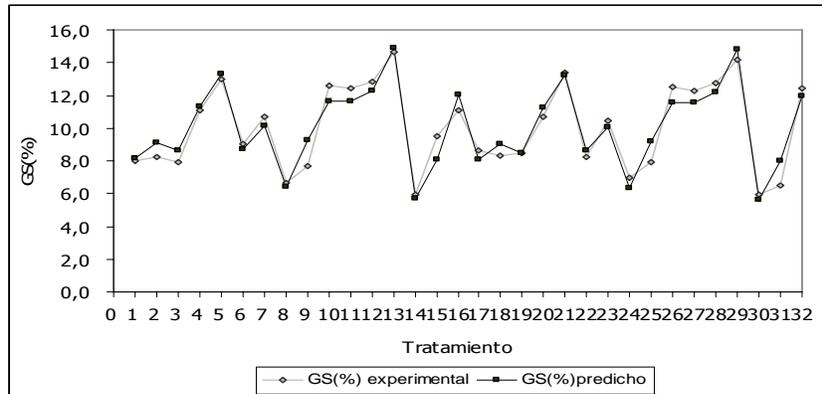


Fig.6: Comparación de los valores experimentales y de los predichos obtenidos en el ajuste del modelo aplicado en GS

La mayor ganancia de sólidos se obtiene cuando se utiliza una concentración de sacarosa de 50 °Brix con adición de 9% de cloruro de sodio, con un tiempo de deshidratación de 3h; empleando estas características de proceso, se obtiene una incorporación de solutos cercana al 12% (p/p). Si bien la ganancia de sólidos depende de las características del tejido vegetal que se está deshidratando (Kowalska & Lenart, 2001), la velocidad de difusión aumenta con el aumento de la concentración de sacarosa a tiempos cortos; sin embargo, una alta concentración de azúcar provoca una saturación mas rápida de soluto osmótico en las capas celulares del tejido vegetal en contacto con la solución osmótica provocando a tiempos largos de deshidratación una menor difusión de sacarosa hacia el interior.

En la Tabla 5 se muestran todas aquellas variables que resultaron significativas ($p < 0,05$) para el contenido de humedad normalizada (C.H.N.) y cambio de color (C.C.).

El análisis de regresión lineal para el modelo cuadrático ajustado pudo explicar un 89% y 70,5% de la variabilidad observada en los datos experimentales obtenidos para el contenido de humedad normalizado y cambio de color en los discos de calabacita deshidratados.

Tabla 5: Tabla ANOVA, variables lineales, cuadráticas e interacciones de cada respuesta

Fuente	g. l.	(Y ₄) Contenido de humedad normalizado (C.H.N.)			(Y ₅) Cambio de Color (C. C.)		
		Suma de cuadrados	F	P-valor	Suma de cuadrados	F	P-valor
X ₁	1				5,0441	82,74	0,0119
X ₂	1	0,0335	126,26	0,0000	4,92131	80,72	0,0122
X ₃	1	0,0421	158,63	0,0000	23,8318	390,92	0,0025
X ₁ X ₁	1	0,0043	16,15	0,0017	8,00498	131,31	0,0075
X ₁ X ₂	1	0,0010	44,84	0,0000	3,13644	51,45	0,0189
X ₁ X ₃	1	0,0000	16,15	0,0017	1,426		0,0193
X ₂ X ₂	1	0,0119	10,25	0,0076	4,253		0,1486*
X ₂ X ₃	1	0,0043	0,01	0,9323	12,5139	205,27	0,0048
X ₃ X ₃	1	0,0027	2,02	0,1187			
Bloques	1	0,0000	0,01	0,9323	0,053		0,4494
Falta de ajuste	19	0,0064			17,807		0,0670
Error	2	0,0032			0,1219		
Total	31	0,1139			75,4345		
R ²		0,9155			0,7623		
R ² ajustado		0,8952			0,70528		

*No significante a un nivel de confianza del 95%

El análisis de varianza aplicado a los factores enunciados más arriba, reveló que la totalidad de los términos lineales de las variables del proceso (X₁, X₂, X₃) tienen un efecto significativo (p<0,05) sobre el C.C., mientras que para C.N.H. sólo X₂, X₃ tuvieron efecto significativo. Resultó además, igualmente significativo para algunos de los términos cuadráticos e interacciones sobre las respuestas evaluadas. En la Figura 7 se muestran los efectos de cada variable independiente (X_n) sobre las respuestas evaluadas (Y₄ e Y₅): C.H.N. y C.C.

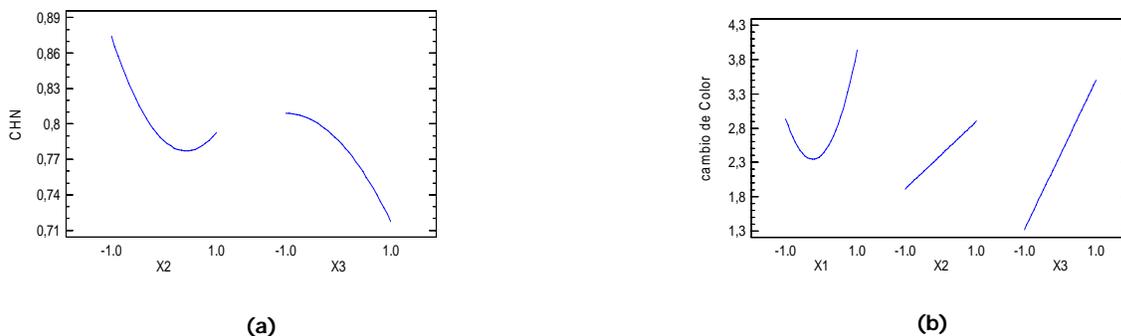


Fig. 7: Efectos de X₁, X₂ y X₃ sobre el contenido de humedad normalizada (a) y cambio de color (b)

El contenido de humedad normalizada varió desde 0.71 a un valor de 0.89 en las condiciones del ensayo. El factor X₂ influyó cuadrática y negativamente sobre el contenido de humedad. Cuando son adicionadas

http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/

cantidades de NaCl en orden creciente: desde un 3% a un 6%, el contenido de humedad disminuye hasta un valor de 0,77. La adición de cantidades mayores de sal a la solución podría influenciar positivamente el aumento en el contenido de humedad como se puede observar en la Figura 7(a). La concentración de sacarosa no fue significativa sobre este parámetro ($p > 0.05$), aunque si en el trabajo realizado por Mayor *et al.* (2007). Dichos autores establecieron que un incremento en las concentraciones de sal y azúcar conduciría a la obtención de un producto más deshidratado, debido posiblemente al aumento del gradiente de concentración de NaCl y sacarosa, que provocaría un incremento en la transferencia de ambos componentes hacia el interior del tejido vegetal. El incremento de estos dos componentes podría disminuir la actividad acuosa de la solución, favoreciéndose de este modo, la transferencia del agua desde el tejido vegetal hacia la solución osmótica. El factor X_3 influyó negativa y cuadráticamente al C.H.N. A medida que aumenta el tiempo de ensayo empleado, disminuye el contenido de humedad en la muestra.

Los valores para el cambio de color oscilaron entre 1,3 y 4,3. El color de la muestra resultó influenciado principalmente por el factor X_1 . El efecto provocado por la concentración de sacarosa sobre el C.C. fue cuadrático y positivo. Si se utilizan concentraciones en orden creciente de sacarosa entre 40° y 50° Brix, C.C. disminuye de 2,8 a 2,3. Luego se produce un incremento en este parámetro provocado por un aumento en la concentración de sacarosa (desde 50° a 60° Brix) empleada para deshidratar.

Los factores X_2 e X_3 afectaron lineal y positivamente el cambio de color en la muestra. A medida que aumentó la adición de sal añadida a la solución y el tiempo de deshidratación, mayor fue la diferencia de color respecto a la calabacita fresca.

En la Tabla 6 se muestran los coeficientes de regresión de los modelos matemáticos usados para predecir el contenido de humedad normalizada y el parámetro cambio de color.

Tabla 6: Tabla de coeficientes para predicción de modelos de CHN y CC

Coeficientes	CHN	CC
β_0	0,7860	2,4056
β_1		0,5022
β_2	-0,0410	0,4961
β_3	-0,0459	1,0916
β_{11}	0,0285	1,0331
β_{22}	0,0475	
β_{33}	-0,0227	
β_{12}		0,4428
β_{13}		
β_{23}	-0,0164	0,8844

Las celdas de color gris indican resultados No significativos a un nivel de confianza del 95%

Se logró un buen ajuste de los datos experimentales obtenidos para C.H.N. y C.C. a una ecuación polinomial de segundo grado ($p > 0,05$), que predice adecuadamente estas variables de proceso.

Los modelos que relacionan las variables de proceso evaluadas con la C.H.N. y C.C. son representados por las ecuaciones 10 y 11:

$$(Y_4) = \text{Contenido de Humedad Normalizado} = 0,7859 - 0,0410 * X_2 - 0,0459 * X_3 + 0,02852 * X_1 X_1 + 0,0475 * X_2 X_2 - 0,01637 * X_2 X_3 - 0,2272 * X_3 X_3 \quad (10)$$

$$(Y_5) = \text{Cambio de color} = 2,4056 + 0,5022 * X_1 + 0,4960 * X_2 + 1,0916 * X_3 + 1,0331 * X_1 X_1 + 0,4428 * X_1 X_2 + 0,8844 * X_2 X_3 \quad (11)$$

Respecto al modelo que predice la variación del contenido de humedad, se puede inferir que la mayoría de los términos lineales, cuadráticos e interacciones tienen un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre Y_4 . El contenido de humedad de la muestra deshidratada disminuye cuando se incrementa el contenido de sal añadida ($\beta = -0,041$) y el tiempo ($\beta = -0,046$) de deshidratación aplicado, esto es indicado por la magnitud de los coeficientes (β) obtenidos para los términos lineales. Igual comportamiento fue señalado por Spiazzi y Mascheroni (1997) y Rastogi y Raghavarao (1997). La concentración de sacarosa no influye significativamente ($p > 0,05$) sobre CHN. La Figura 8 muestra el efecto de los tres factores evaluados sobre la respuesta Y_4 .

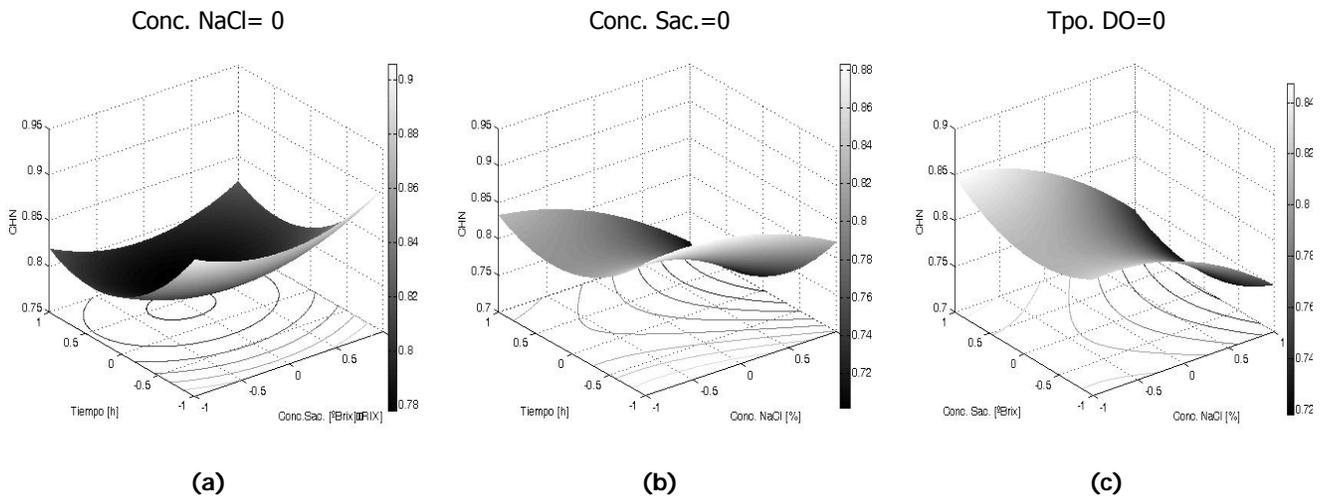


Fig. 8: Efecto del tiempo de proceso y de la concentración de sacarosa y NaCl sobre el contenido de humedad normalizado

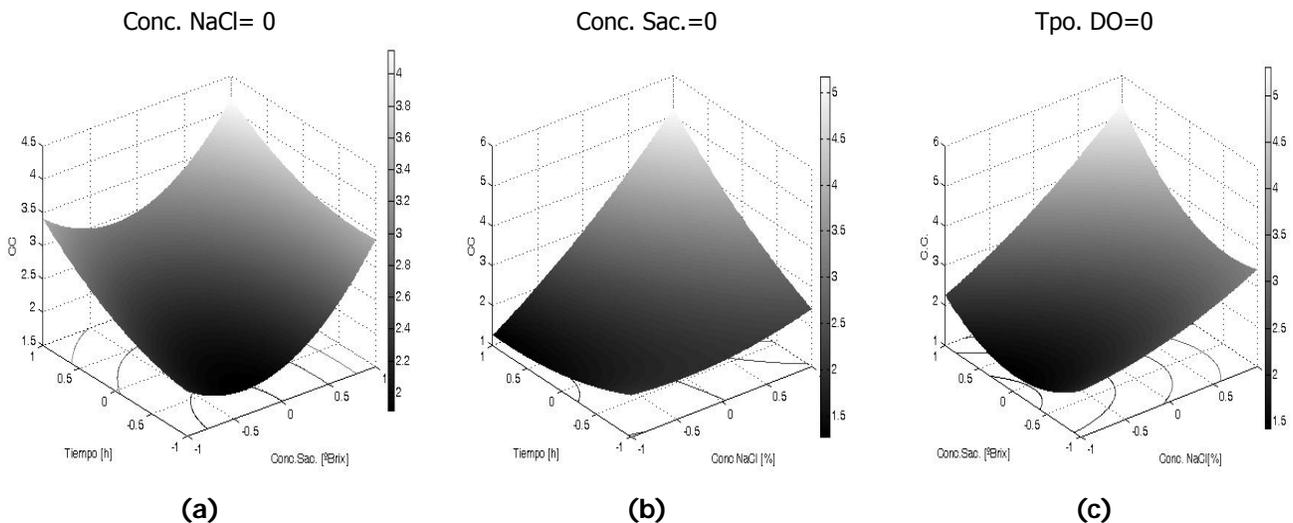


Fig. 9: Efecto del tiempo de proceso y de las concentraciones de sacarosa y NaCl sobre el cambio de color

En cuanto al parámetro cambio de color, los tres factores analizados, (X_n), concentraciones de sacarosa y NaCl y tiempo de proceso osmótico, tuvieron efectos positivos y significativos ($p < 0,05$), indicando que el cambio de color de la muestra deshidratada es mayor, cuanto mayores son las concentraciones de soluto y tiempo DO empleados.

En la literatura científica Mandala *et al.* (2005), reportaron que las muestras osmotizadas presentan menor decoloración debido a la menor transferencia de oxígeno en la superficie del producto por la absorción de soluto, evitando que se genere el pardeamiento de la misma inactivando la acción enzimática.

En la Figura 9 se muestra el efecto combinado de dos factores en la respuesta color.

Optimización de respuesta múltiple

Las condiciones óptimas para la deshidratación osmótica de calabacita fueron determinadas para obtener una máxima pérdida de agua y reducción de peso, una mínima ganancia de sólidos, de contenido normalizado de humedad y cambio de color. Aplicando el método de la función de conveniencia de Statgraphics Plus 5.1 (*desirability function*), fueron encontradas las siguientes condiciones óptimas de procesamiento (Fig. 7): concentración de solución de sacarosa de 60°Brix, concentración de cloruro de sodio de 6,38% (g/100g de sacarosa) y un tiempo de procesamiento 2hs. y 24 min. de las cuales se obtuvieron las siguientes respuestas óptimas del proceso: PA = 54.48%, GS = 9.05%, RP=48,59%, CHN= 0,787 y un cambio de color= 4.547.

Para identificar las condiciones óptimas se consideraron las variables X_1 y X_2 , manteniendo en un valor medio, a la tercera variable independiente, $X_3=0$. Se pudo identificar una zona de operación óptima para la deshidratación de calabacita, cuyo valor codificado (D_{op}) fue de 0,6890, que en la Figura 10 se puede observar en el extremo derecho superior del cubo.

Los valores obtenidos se correlaciona con lo concluido por Mayor *et al.* (2007), quienes afirman que para obtener un producto deshidratado con una mínima ganancia de sólidos se debería adicionar pequeñas cantidades de NaCl en la solución osmótica para disminuir el potencial osmótico, favoreciendo la remoción de agua y obteniendo una ganancia de sólidos no excesiva.

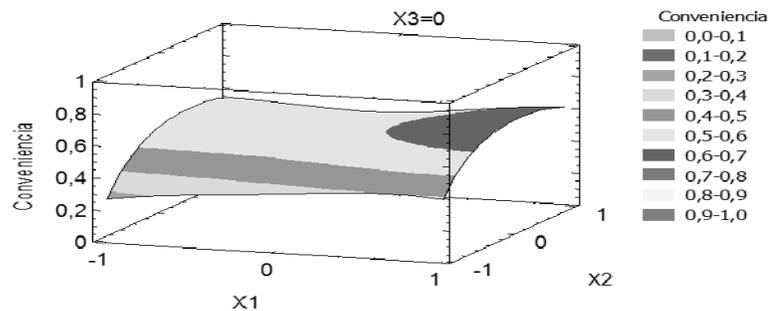


Fig. 10: Gráfico de conveniencia

CONCLUSIONES

La metodología de análisis de superficie de respuesta resultó efectiva para determinar las condiciones óptimas de procesamiento para maximizar la pérdida de agua y pérdida de peso, minimizar la ganancia de sólidos, contenido de humedad y cambio de color durante la deshidratación de calabacita. El análisis de varianza mostró significancia de todos los modelos polinómicos de segundo orden desarrollados para las 5 respuestas. Las condiciones óptimas encontradas fueron concentración de solución de sacarosa de 60°Brix, concentración de cloruro de sodio de 6,38% (g/100g de sacarosa) y un tiempo de procesamiento 2hs. y 24 min. Dichas condiciones corresponden a una pérdida de agua de 54.48%, ganancia de sólidos del 9.05%, reducción de peso de 48,59%, un contenido de humedad normalizada del 0,787 y un cambio de color de 4.547. En consecuencia fue posible identificar una zona común de operación óptima para la deshidratación osmótica de calabacita con empleo de soluciones ternarias.

REFERENCIAS

1. Alves, D.G., Barbosa, J.L., Antonio, G.C. & Murr, F.E.X. (2005). Osmotic dehydration of acerola fruit (*Malpighia puniceifolia* L.). *Journal of Food Engineering*: 68, 99- 103.
2. AOAC, (1995). Official Methods of Analysis. 16ª ed. Washington, DC, USA. Association of Official Analytical Chemists.
3. Bekele, Y. & Ramaswamy, H. (2010). Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings. *Engineering Journal and Science Technology (EJAST)*: 1(1), 1-15.
4. Box, P.E.G., Hunter, G.W. & Hunter, S.J. (2005). Estadística para investigadores: Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos, Barcelona, España Ed. Reverté; 525p.
5. C.I.E. (1986). Colorimetric, Second Edition. Publication C.I.E. Nº 15, 2. Viena: Central Bureau of the Comision Internazionale de L´Eclairage.
6. Corzo, O. & Gómez, R.E. (2004). Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using function methodology. *J. of Food Eng.*: 64, 213-219.
7. De Escalada Pla, M.F., Ponce, N.M., Stortz, C.A., Gerschenson, L.N. & Rojas, A.M. (2007). Composition and functional properties of enriched fiber products obtained from pumpkin (*Cucurbita Moschata Duchesne ex Poiret*). *LWT- Food Science and Technology*: 40, 1176-1185.
8. Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J. of Food Eng.*: 79, 243-248.
9. Dutta, A., Raychaudhuri, U. & Chakraborty, R. (2006). Rheological characteristic and thermal degradation kinetics of beta – carotene. *J. of Food Eng.*: 76, 538-546.
10. Eren, I. & Kaymak-Ertekein, F. (2007). Optimization of the osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *J. of Food Eng.*: 79, 344-352.
11. Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., Gaspareto, O.C.P. & Oliveira, E.L. (2006). Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. *J. of Food Eng.*: 77, 188-193.
12. Ferreira, S., Bruns, R., Ferreira H., Matos G., David J., Brandao G.C., *et al.* (2007). Box–Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*: 597, 179-186.
13. Giraldo, G., Talens, P., Fito, P. & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *J. of Food Eng.*: 58, 33- 43.
14. Karathanos, V.T., Kostaropoulos, A.E. & Saravacos, G.D. (1995). Air drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*: 13, 1503-1512.
15. Kowalska, H. & Lenart, A. (2001). Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. *J. of Food Eng.*: 49, 137-140.
16. Lazarides, H.N. (1994). Osmotic pre-concentration: developments and prospects. In: Minimal processing of foods and process optimisation; an interface; CRC Press, London, UK.
17. Lenart, A. & Flink, J.M. (1984). Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of osmosis process. *J. Food Technology*: 19, 45-60.

18. Mandala, I.G., Anagnostaras, E.F. & Oikonomou, C.K. (2005). Influence of Osmotic Dehydration Conditions on Apple Air-Drying Kinetics and Their Quality Characteristics. *J. of Food Eng.:* 69, 307-316.
19. Mayor, L., Moreira, R., Chenlo, F. & Sereno, A.M. (2006). Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. *J. of Food Eng.:* 74, 253-262.
20. Mayor, L., Moreira, R., Chenlo, F. & Sereno, A.M. (2007). Osmotic dehydration kinetics of pumpkin fruits using ternary solutions of sodium chloride and sucrose. *Drying Technology:* 25, 1749-1758.
21. Panagiotou, N.M., Karathanos, V.T. & Maroulis, Z.B. (1999). Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology:* 17, 175-189.
22. Rahman, M.S. & Perera, C.O. (2007). Drying and Food Preservation. In Rahman M. S., Handbook of food preservation, 2° ed. CRC Press; 412p.
23. Raoult-Wack, A.L., Bozt, O., Guilbert, S. & Ríos, G. (1991). Simultaneous water and solute transport in shrinking media. Part I. Application to dewatering and impregnation soaking process analysis (Osmotic dehydration). *Drying Technology:* 9, 589-612.
24. Rastogi, N.K., & Raghavarao, K.S.M.S. (1997). Mass transfer during osmotic dehydration of carrot: comparison of different methods for estimation of effective diffusivities. In R. Jowitt. (Ed.). Engineering and food (Part. 2) (G73-G76). London: Sheffield Academic Press.
25. Rastogi, N.K. & Raghavarao, K.S.M.S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Food Science and Technology: LWT:* 37(1), 43-47.
26. Sachetti, G, Gianotti, A. & Rosa, M.D. (2001). Sucrose salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability: study on apple osmotic treatment. *J. of Food Eng.:* 49, 163- 173.
27. Shi, J. & Le Maguer, M. (2002). Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects. *Food Rev. Int.:* 18, 305-335.
28. Sing, B., Kumar, A. & Gupta, A.K. (2007). Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *J. of Food Eng.:* 79, 471- 480.
29. Singh, B., Panesar, P.S., Nanda, V. & Kennedy, J.F. (2010). Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *J. of Food Eng.:* 123, 590-600.
30. Souza, J.S.S., Medeiros, M.F.D., Magalhes, S.R. & Fernandes, F.A.N. (2007). Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying. *J. of Food Eng.:* 83, 501-509.
31. Spiazzi, E.A. & Mascheroni, R.H. (1997). Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables. I. Development of the simulation model. *J. of Food Eng.:* 31, 387- 410.
32. Talens, P., Martinez Navarrete N., Fito, P. & Chiralt, A. (2002). Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies:* 3(2), 191-199.