

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

CINÉTICA DEL SECADO E INDICADORES DE CALIDAD DE LA CALABAZA (*CUCURBITA MOSCHATA* DUCH.) DESHIDRATADA POR RADIACIÓN INFRARROJA

DRYING KINETICS AND QUALITY INDICATORS OF THE PUMPKIN (*CUCURBITA MOSCHATA* DUCH.) DEHYDRATED BY INFRARED RADIATION

Claudia Ramírez Alfonso** (0000-0002-6758-7702)
Aydili Hernández González^a (0000-0002-1337-3733)
Jorge A. Pino^{a,b} (0000-0002-1079-7151)
José L. Rodríguez^a (0000-0003-1421-1174)
Margarita Núñez de Villavicencio^a (0000-0003-2114-3900)

^a Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera al Guatao km 3 ½, CP 17100, Cuba.

^b Dpto. Alimentos. Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana, Cuba.

* claudia@iiaa.edu.cu

Recibido: 23 de enero de 2023;

Aceptado: 15 de julio de 2023;

RESUMEN

La calabaza (*Cucurbita moschata* Duch.) proporciona una fuente valiosa de β -caroteno, precursor de la vitamina A. La reducción de humedad contribuye a aumentar la estabilidad, debido a la reducción de la actividad de agua, por lo que la harina de calabaza puede ser usada en productos horneados, sopas, cremas, fideos y como colorante natural. El objetivo general de este trabajo fue evaluar la cinética del secado e indicadores de calidad de la calabaza deshidratada por radiación infrarroja. El secado por infrarrojo de los cubos de calabaza a 50, 60 y 70 °C requirió 480, 330 y 270 min, respectivamente, para reducir el contenido de humedad de 88,98 % m/m a 10 % m/m; con un rendimiento del 10 % m/m. El modelo parabólico fue el que mejor representó la cinética de la relación de humedad. La difusividad efectiva del agua fue $1,013 \times 10^{-9}$, $2,026 \times 10^{-9}$ y $3,039 \times 10^{-9}$ m²/s, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente. Las diferencias con otros estudios similares pueden estar dadas por la forma de transferencia de energía, especie usada y que, a altas temperaturas de secado se obtienen difusividades efectivas mayores. La energía de activación del proceso de secado fue 45,67 kJ/mol, lo que está en el rango para los productos alimenticios. La temperatura de secado no tuvo influencias en la humedad, densidad bruta, densidad compactada y cohesividad de los polvos. Los parámetros colorimétricos fueron influenciados por la temperatura de secado y muestran que el producto se oscurece al aumentar la temperatura debido a la reacción de Maillard.

Palabras claves: calabaza, secado por infrarrojo, cinética de secado, modelación, indicadores de calidad.

ABSTRACT

Pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) provides a valuable source of β -carotene, a precursor of vitamin A. Reducing moisture contributes to increase stability, due to reduced water activity, so the pumpkin flour can be used in baked goods, soups, creams, noodles and as natural coloring. The general objective of this work was to evaluate the drying kinetics and quality indicators of pumpkin dehydrated by infrared radiation. Infrared drying of pumpkin cubes at 50, 60 and 70 °C required 480, 330 and 270 min, respectively, to reduce the moisture content from 88.98% m/m to 10% m/m; with a yield of 10% m/m. The parabolic model was the best represented the kinetics of the moisture ratio. The effective diffusivity of water was 1.013×10^{-9} , 2.026×10^{-9} and 3.039×10^{-9} m²/s, for 50, 60 and 70 °C, respectively. The differences with other similar studies may be due to the form of energy transfer, the species used and that, at high drying temperatures, higher effective diffusivities are obtained. The activation energy of the drying process was 45.67 kJ/mol, which is in the range for food products. The moisture, bulk density, compacted density and cohesiveness of the powders were not affected by the drying temperature. The colorimetric parameters were influenced by the drying temperature and show that the product darkens with increasing temperature due to the Maillard reaction.

Keywords: pumpkin, infrared drying, drying kinetics, modeling, quality indicators.

INTRODUCCIÓN

La calabaza (*Cucurbita moschata* Duch.) contiene aproximadamente 1,5 a 2,5 g de fibra por cada 100 g de porción comestible (Aguilar, 2017), que mejora el tránsito intestinal, previniendo el estreñimiento y colaborando en la protección frente al cáncer de colon y la enfermedad cardiovascular. El contenido de agua, carbohidratos y fibras es alto, además aporta 45 cal. de valor energético. Respecto al contenido de micronutrientes, contiene β -caroteno y vitamina C, así como vitaminas E, B₁, B₃ y B₆. En cuanto a minerales, es un alimento rico en potasio, contiene también fósforo y magnesio, pero en cantidades menores (Almazán, 2019).

La reducción de la humedad en la *Cucurbita moschata* (calabaza) contribuye a aumentar la estabilidad, debido a la reducción de la actividad de agua, que minimiza el crecimiento de microorganismos y velocidades de reacciones de deterioro (Batista et al., 2014), por lo que elaborar productos a partir de la harina de calabaza representa una opción innovadora pudiendo ser usada como suplemento en harinas de cereales en productos de horneado, sopas, cremas, fideos y colorante natural en pasta y mezclas de harinas (Sadeghi et al., 2019; Zavalishina et al., 2021).

La tecnología de secado ha evolucionado desde el simple uso de energía solar hasta la tecnología actual que incluye, entre otros, secado en horno, en bandeja, en túnel, por aspersión, en tambor, liofilización, en espuma, deshidratación osmótica, extrusión, fluidización y el uso de microondas, radiofrecuencia, ventana de refractancia y tecnología de obstáculos (Vega-Mercado et al., 2001). Basados en su desarrollo histórico, los sistemas de secado pueden categorizarse en cuatro grupos o generaciones. Los secadores de tipo cama y gabinete (es decir, horno, bandeja, transportador de flujo rotatorio y túnel) pertenecen a la primera generación. Este tipo de secador involucra aire caliente que fluye sobre la superficie. Los secadores de este grupo son en su mayoría adecuados para materiales sólidos como cereales, frutas y verduras en rodajas o productos en trozos. Los secadores de segunda generación ofrecen una mayor eficiencia y una mayor capacidad de personalización en comparación con los secadores de la primera generación y están más dedicados a la deshidratación de lodos y purés. Entre estos se encuentran los atomizadores y secadores de tambor destinados a deshidratados y escamas. La liofilización y deshidratación osmótica pertenecen a la tercera generación. Las tecnologías de deshidratación, que involucran alto vacío, fluidización y el uso de microondas, infrarrojo, radiofrecuencia, ventanas de refractancia y la tecnología de barreras. Cada una de estas tecnologías tiene una aplicación específica basada en los atributos de calidad final de los productos previstos, así como las características físicas y químicas de las materias primas que se procesan. Las microondas y radiofrecuencias son de mayor interés entre los investigadores y procesadores de alimentos debido a las posibilidades de ahorro de energía que pueden representar (Vega-Mercado et al., 2011).

La radiación infrarroja es un método de transferencia de calor que permite el secado de alimentos producida por la interacción entre las ondas electromagnéticas originadas por el generador de infrarrojo y el agua presente en el alimento, que causa vibraciones mecánicas de las moléculas o de un conjunto molecular particular en un fenómeno muy complejo que genera un calentamiento volumétrico (Ghaboos et al., 2016).

En la literatura hay reportes del secado de calabaza, pero la mayoría de ellos utilizan otras formas de transferencia de energía para el secado y otras especies de calabaza (Akpınar et al., 2003; Alibas, 2007; Doymaz, 2007; Arévalo-Pinedo & Murr, 2007; Nawirska et al., 2009; Perez & Schmalko, 2009; Limpiboon, 2011; Guiné et al., 2011; Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011; Roongruangsri & Bronlund, 2016; Caliskan & Dirim, 2017; Klava et al., 2018; Tarwaca et al., 2021). Se concluyó que el tiempo de secado más corto se obtuvo con la temperatura más alta, teniendo comportamientos similares el secado por infrarrojo y el secado convectivo. Mientras que el secado por microondas desarrolla gradientes internos de humedad que aumentan la velocidad de secado en comparación con el secado por radiación infrarroja y con el método convectivo. La aplicación del método de vacío-microondas acorta aproximadamente 10 veces el tiempo de secado en comparación con el método convectivo, pero este se considera el más adecuado para la obtención de polvo de calabaza con el mayor contenido de ácido ascórbico,

fenoles totales y actividad antioxidante. También se destaca el secado neumático que posee un buen potencial para producir polvo de calabaza con alta calidad sensorial y valor nutricional. Se encontró que la difusividad efectiva del agua en el secado por infrarrojo fue mayor que los valores obtenidos por secado convectivo según Limpaiboom (2011), mientras que fue menor que los reportados por Caliskan y Dirim (2017). Asimismo, los resultados del presente trabajo fueron similares a los informados por otros investigadores (Arévalo-Pinedo & Murr, 2007; Perez & Schmalko, 2009; Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011). La energía de activación fue mayor en secado por infrarrojo, mientras que fue menor en el secado convectivo de la calabaza. Esto es una indicación de que se requiere menos energía para el secado en los trabajos antes citados. Las diferencias observadas pueden ser atribuidas a la forma de transferencia de energía, grosor de la muestra y especie usada. No obstante, los valores encontrados en secado convectivo fueron menores que el reportado por Doymaz (2007).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la cinética del secado e indicadores de calidad de la calabaza (*Cucurbita moschata* Duch.) deshidratada por radiación infrarroja a diferentes temperaturas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las calabazas frescas (*C. moschata*), cosechadas en agosto de 2022 se obtuvieron de la Cooperativa de Créditos y Servicio Fortalecida Roberto Negrín del municipio La Lisa en La Habana. El color de la cáscara fue verde intenso con manchas verdes claras y amarillas, mientras que el color de la masa fue amarillo intenso. La masa presentó un contenido promedio de humedad de 88,98 % m/m (desviación estándar 1,3 % m/m); 7,8 °Brix (desviación estándar 0,4 °Brix), $L^* = 60,32$; $a^* = 24,30$ y $b^* = 58,83$. En cada corrida experimental se utilizaron tres calabazas, las que se lavaron con agua corriente, pelaron y eliminaron las semillas, y se cortaron en cubos con aristas de 1 cm (aproximadamente 1,7 g cada uno).

A las muestras frescas se le determinaron humedad en una termobalanza electrónica Sartorius AG, modelo MA35 (Göttingen, Alemania) a 105 °C. Además, una vez pasadas por un homogeneizador, se le midieron los sólidos refractométricos en un equipo ABBE (Oberkochen, Alemania) con control de temperatura (AOAC, 2019) y el color con un espectrofotómetro modelo UV-2600 UV-Visible (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón). Se usó un compartimiento de muestra grande (con esfera integradora incorporada), medición de 380 a 780 nm, velocidad de barrido media, 8 nm de ancho de abertura y medición fotométrica en modo porcentaje de reflectancia. Las muestras fueron colocadas en celdas 2 cm de diámetro con placa de vidrio. El cálculo de las coordenadas de color en el sistema CIELAB fue realizado mediante el programa UVPC Color Analysis ver. 3.12 de Shimadzu Corp. Los análisis se hicieron por triplicado.

El proceso de secado por radiación infrarroja se hizo en una termobalanza electrónica Sartorius AG, modelo MA35 (Göttingen, Alemania). Los cubos de calabaza (30 g, aproximadamente 17 cubos) fueron colocados uniformemente sobre el platillo desechable. El secado se realizó a tres temperaturas: 50, 60 y 70 °C (Roongruangsri & Bronlund, 2016). La pérdida de peso fue medida cada 15 min durante la primera hora y cada 30 min hasta alcanzar la humedad deseada por registro del peso final de los cubos de calabaza. El secado se mantuvo hasta que los cubos presentaron un contenido de humedad de 10 % m/m, que es el máximo permisible para su posterior molienda. Las corridas experimentales se realizaron por triplicado.

La relación de humedad se calculó según la ecuación 1 (Song et al., 2019).

$$RH = \frac{X_t}{X_o} \quad \text{ec. 1}$$

Donde

X_o y X_t representan la humedad base seca (kg agua/kg masa seca) en la etapa inicial y en el tiempo t , respectivamente.

Se utilizaron seis modelos matemáticos de capa fina, comúnmente usados en las investigaciones (Levate-Macedo et al., 2020), para representar la cinética de secado (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos matemáticos de capa fina utilizados para representar la cinética de secado

Modelo	Ecuación
Henderson y Pabis (H y P)	$RH = a \cdot e^{-kt}$
Lewis	$RH = e^{-kt}$
Midilli	$RH = e^{-kt^n} + bt$
Page	$RH = e^{-kt^n}$
Parabólico	$RH = a + bt + ct^2$
Wang y Singh	$RH = 1 + at + bt^2$

RH: relación de humedad; t: tiempo (min); k, a, n, b y c: parámetros del modelo.

El coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y error estándar de la regresión (SE por sus siglas en inglés) fueron calculados mediante el programa SPSS ver. 25 (SPSS Inc., Chicago, EE. UU.)

La difusividad efectiva del agua (D_{eff}) se calculó a partir del modelo de difusión de la segunda ecuación de Fick (ecuación 2) (Levate-Macedo et al., 2020), que resulta adecuada para fenómenos difusivos durante la transferencia de masa del producto hasta alcanzar el equilibrio (Vega-Gálvez et al., 2010). Para este fin, se asumió que los cubos de calabaza se asemejan a una lámina infinita, que la transferencia de masa es unidimensional y los tiempos de secado son largos (Doymaz, 2007).

$$RH = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L^2}} \quad \text{ec. 2}$$

Donde

RH: relación de humedad,

D_{eff}: difusividad efectiva del agua (m²/s),

t: tiempo (s)

L: semiespesor de la muestra (m).

La ecuación anterior puede expresarse en forma logarítmica y para periodos largos de secado ($RH < 0,6$), puede calcularse la D_{eff} a partir de la pendiente del gráfico de $\ln RH$ vs. tiempo de secado (ecuación 3).

$$\ln RH = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right) t \quad \text{ec. 3}$$

Donde:

RH: relación de humedad,

D_{eff}: difusividad efectiva del agua (m²/s),

t: tiempo (s)

L: semiespesor de la muestra (m).

La influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva del agua en los alimentos, generalmente, sigue una tendencia tipo Arrhenius, que puede representarse por la relación descrita en la ecuación 4 y al graficar $\ln D_{eff}$ vs. $1/T$ se obtiene una línea recta de cuya pendiente se calcula la E_a y del intercepto se obtiene el factor de Arrhenius (D_0).

$$D_{eff} = D_o e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

D_o : factor preexponencial de la ecuación de Arrhenius (m^2/s)

E_a : energía de activación (kJ/mol)

R : constante del gas ideal (kJ/mol K)

T : temperatura (K).

Las muestras deshidratadas de las tres corridas experimentales, a cada temperatura, se pasaron por un molino para polvo modelo IKA M20S3 (Staufen, Alemania) durante 1 min. A las tres muestras en polvo se le determinaron humedad en una termobalanza electrónica Sartorius AG, modelo MA35 (Göttingen, Alemania) a 105°C , densidad bruta y compactada (Fariás-Cervantes et al., 2016), cohesividad (Jinapong et al., 2008) y color con un espectrofotómetro modelo UV-2600 UV-Visible (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón), con iguales condiciones a la calabaza fresca, con excepción de que los polvos se reconstituyeron antes hasta igual contenido de sólidos refractométricos.

A las muestras deshidratadas también se le determinaron la diferencia total de color (ΔE), croma (C^*) y matiz (H°) de acuerdo con las ecuaciones 5, 6 y 7 (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014).

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

Donde ΔL , Δa y Δb son las diferencias entre el polvo y la muestra fresca para cada parámetro.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{ec. 6})$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (\text{ec. 7})$$

Las respuestas de los análisis fueron sometidos a análisis de varianza, seguido de la prueba para discriminar entre las medias por el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Los análisis estadísticos se hicieron mediante Statgraphics Centurion XV ver. 15.2.05 (StastPoint, Inc., Warrenton, VA. EE. UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas experimentales de secado muestran las tres temperaturas estudiadas (Figura 1). Se necesitaron 480, 330 y 270 min a 50 , 60 y 70°C , respectivamente, para reducir el contenido de humedad desde $88,98\%$ m/m hasta 10% m/m. Curvas similares y menores tiempos fueron informados con el secado convectivo de calabaza (Akpınar, 2003, 2006; Nawirska et al., 2009; Limpaiiboon, 2011; Caliskan & Dirim, 2017).

Los modelos de secado de capa fina (Henderson y Pabis, Lewis, Midilli, Page, parabólico, y Wang y Singh) se utilizaron para describir el comportamiento de secado de cubos de calabaza durante el secado por radiación infrarroja. Los parámetros del modelo y los resultados estadísticos (R^2 , R^2_{adj} y SE) se presentan en la Tabla 2. El coeficiente de determinación (R^2) mide la variación proporcional en la respuesta atribuida al modelo más que al error aleatorio y se afirma que para un buen modelo ajustado, R^2 no debe ser menor al $0,8$ (Stat-Ease, Inc., 2019). Por tanto, los modelos se ajustaron a los datos experimentales de RH , pues presentaron valores altos de R^2 entre $0,831$ y $0,999$ (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de los parámetros de los modelos y de correlación de los modelos de secado evaluados

T (°C)	Modelo	a o n	b	c o k	R^2	R^2_{adj}	SE
50	H y P	0,406	-	-0,006	0,831	0,821	0,455
	Lewis	-	-	-0,005	0,880	0,873	0,502
	Midilli	0,059	-0,002	-0,016	0,998	0,995	0,040
	Page	1,690	-	$7,252 \times 10^{-5}$	0,993	0,991	0,032
	Parabólico	1,030	-0,002	$4,039 \times 10^{-7}$	0,998	0,998	0,016
	W y S	-0,002	$-3,353 \times 10^{-8}$	-	0,999	0,999	0,021
60	H y P	0,383	-	-0,012	0,916	0,909	0,425
	Lewis	-	-	-0,010	0,945	0,941	0,472
	Midilli	1,067	0,000	0,004	0,997	0,992	0,041
	Page	1,260	-	0,002	0,992	0,991	0,036
	Parabólico	0,989	-0,005	$7,156 \times 10^{-6}$	0,998	0,997	0,018
	W y S	-0,005	$7,491 \times 10^{-6}$	-	0,999	0,999	0,018
70	H y P	0,256	-	-0,016	0,976	0,974	0,295
	Lewis	-	-	-0,015	0,987	0,986	0,324
	Midilli	1,226	$-4,04 \times 10^{-5}$	0,004	0,998	0,991	0,041
	Page	1,251	-	0,004	0,998	0,990	0,033
	Parabólico	0,980	-0,008	$1,467 \times 10^{-5}$	0,996	0,995	0,025
	W y S	-0,008	$1,531 \times 10^{-5}$	-	0,999	0,999	0,026

R^2 : coeficiente de determinación; R^2_{adj} : coeficiente de determinación ajustado; SE: error estándar de la regresión.

Para todas las temperaturas, el modelo parabólico fue el que mejor se ajustó, pues presentó los valores más altos de R^2_{adj} y más bajos de SE, que fueron escogidos como criterios de bondad de ajuste (Erbay & Icier, 2009).

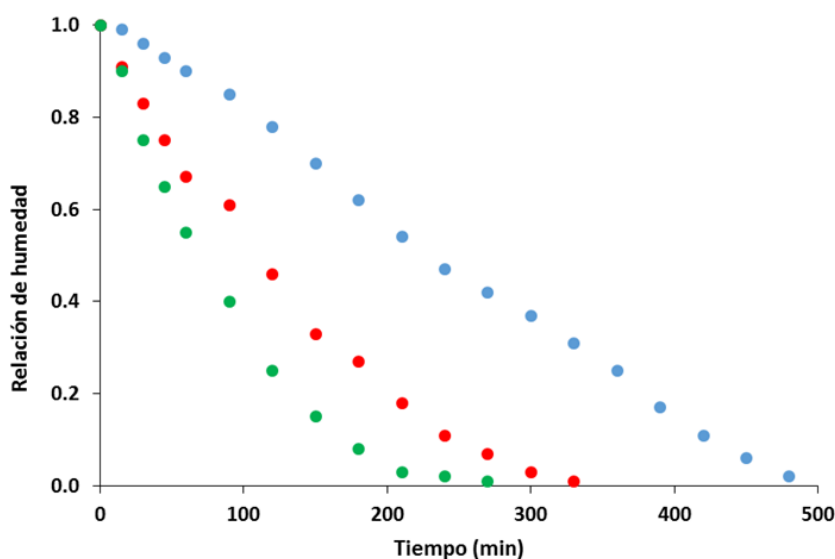


Fig. 1. Variación de la relación de humedad a 50 °C (azul), 60 °C (roja) y 70 °C (verde).

La difusividad efectiva del agua (D_{eff}), medida de la capacidad del agua para difundirse de los cubos de calabaza, fue de $1,013 \times 10^{-9}$, $2,026 \times 10^{-9}$ y $3,039 \times 10^{-9}$ m²/s, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente, en el secado por infrarrojo. Estos valores indican que a medida que aumenta la temperatura aumenta la D_{eff} , lo que significa que el agua podrá moverse más fácilmente. Se encontró que la D_{eff} del secado por infrarrojo de los cubos fue mayor que los resultados que

obtuvieron Akpinar et al. (2003), Doymaz (2007), Guiné et al. (2011) y Limpaiboom (2011), mientras que fue menor que los de Caliskan & Dirim (2017). Asimismo, los resultados del presente trabajo fueron similares a los informados por otros investigadores (Arévalo-Pinedo & Murr, 2007; Perez & Schmalko, 2009; Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011). En general, las diferencias pueden estar dadas por la forma de transferencia de energía, la especie usada y que, a altas temperaturas de secado, debido a la rápida velocidad de evaporación, se pueden obtener valores de D_{eff} más altos (Doymaz, 2007; Guiné et al., 2011; Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011).

La dependencia de la D_{eff} con la temperatura de secado también fue descrita por la ecuación de Arrhenius, de donde se determinó un valor de energía de activación de 45,67 kJ/mol. Este valor está en el rango de 13 a 110 kJ/mol para la energía de activación en alimentos. El valor encontrado es mayor que el valor informado para el secado convectivo de calabaza (Perez & Schmalko, 2009; Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011; Guiné et al., 2011; Limpaiboom, 2011). De acuerdo con los resultados de los análisis a los polvos obtenidos a las tres temperaturas (Tabla 3), se aprecia que las densidades bruta y compactada no tuvieron diferencias significativas entre los polvos obtenidos a cada temperatura.

Las cohesividades no se diferenciaron entre las tres temperaturas. En términos de propiedades de manipulación, los polvos tuvieron características de flujo similares y son considerados como poco cohesivos (Tabla 3). Como los valores fueron inferiores a 1,2; los polvos tuvieron una alta fluidez (Hausner, 1967). La explicación de esta alta fluidez en partículas de tamaño pequeño se debe a la poca superficie por unidad de masa del polvo. Este es un resultado esperado pues la reducción del tamaño de las partículas aumenta el área de contacto entre las partículas, lo que permite una mayor interacción entre las fuerzas cohesivas (Fitzpatrick et al., 2004).

Los parámetros colorimétricos de los polvos fueron influenciados por la temperatura de secado (Tabla 3). El parámetro L^* disminuyó significativamente con el incremento de la temperatura, es decir, se oscurecieron las muestras y disminuyó la luminosidad. El parámetro a^* fue mayor en el polvo de 70 °C, lo que indica una mayor tendencia al rojo, y significativamente diferente a las otras dos temperaturas. El parámetro b^* fue mayor en el polvo a 50 °C, lo que revela una mayor tendencia al amarillo, y significativamente diferente a las otras dos temperaturas. Estas tendencias significan que a medida que aumenta la temperatura el polvo se va pardeando. Durante el secado se produce la reacción de Maillard con la formación de pigmentos oscuros o pardos, que modifican el color del producto. Esta reacción es inducida por la temperatura, donde las más altas tienden a producir pigmentos más oscuros (Lund & Ray, 2017).

Tabla 3. Características de la calabaza deshidratada a tres temperaturas

Característica	50 °C	60 °C	70 °C
Humedad (% m/m)	10,00 ^a (0,65)	9,99 ^a (0,54)	10,00 ^a (0,57)
Densidad bruta (g/mL)	0,8333 ^a (0,043)	0,8335 ^a (0,052)	0,8331 ^a (0,034)
Densidad compactada (g/mL)	0,9090 ^a (0,051)	0,9092 ^a (0,060)	0,9089 ^a (0,042)
RH	1,1 ^a (0,09)	1,1 ^a (0,10)	1,1 ^a (0,09)
L^*	65,90 ^a (1,4)	59,09 ^b (1,7)	51,72 ^c (1,6)
a^*	12,45 ^b (0,07)	12,89 ^b (0,15)	15,11 ^a (0,64)
b^*	50,24 ^a (1,1)	44,48 ^b (0,7)	41,22 ^b (1,3)
ΔE	15,65 ^b (0,27)	18,38 ^b (0,54)	21,64 ^a (1,39)
Croma	51,76 ^a (1,17)	46,33 ^b (0,71)	43,91 ^b (0,98)
Matiz	75,99 ^a (0,13)	73,84 ^a (0,06)	69,82 ^b (1,39)

Desviación estándar entre paréntesis, RH: relación de Hausner, L^ : luminosidad, a^* : rojez, b^* : amarillez, ΔE : diferencia total de color. Letras distintas dentro de una misma fila indican diferencia significativa para $p \leq 0,05$.*

El parámetro ΔE fue significativamente mayor en el polvo de 70 °C con respecto a las otras dos temperaturas, pero en todos los casos se considera claramente visible e inaceptable, teniendo en cuenta la muestra fresca de calabaza.

Los parámetros C^* y H° fueron similarmente influenciados por la temperatura de secado, presentando los valores más bajos en la muestra sometida a la mayor temperatura. Como resultado, esta muestra mostró una menor saturación y un matiz más rojizo.

CONCLUSIONES

El secado por infrarrojo en la termobalanza electrónica de los cubos de calabaza a 50, 60 y 70 °C requirió 480, 330 y 270 min, respectivamente, para reducir el contenido de humedad de 88,98 % m/m a 10 % m/m; con un rendimiento del 10 % m/m. El modelo parabólico fue el que mejor representó la cinética de la relación de humedad. La difusividad efectiva del agua fue $1,013 \times 10^{-9}$, $2,026 \times 10^{-9}$ y $3,039 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente. La energía de activación del proceso de secado fue 45,67 kJ/mol, que está en el rango para los productos alimenticios. La humedad, densidad bruta, densidad compactada y cohesividad de los polvos no se afectaron por la temperatura de secado, mientras que los parámetros colorimétricos si fueron influenciados y muestran que ocurre la reacción de Maillard con la modificación del color del producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M. B. (2017). Caracterización morfoagronómica de seis cultivares de ayote (*Cucurbita moschata* Duch.) e incidencia de artrópodos y enfermedades. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Alibas, I. (2007) Microwave, air and combined microwave-air drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 1445-1451.
- Almazán, V. (2019). Aprovechamiento de la calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*) para la elaboración de productos alimenticios. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- AOAC (2019). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemist. Gaithersburg, Maryland, USA: AOAC International.
- Arévalo-Pinedo, A., y Murr, F. E. X. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80, 152-156.
- Akpınar, E. K., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Experimental investigation of drying behavior and conditions of pumpkin slices via acyclone-type dryer. *Journal of the Science and Food Agriculture*, 83, 1480-1486.
- Akpınar, E. K., Midilli, A., & Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*, 72, 320- 331.
- Batista, D. d. V. S., Cardoso, R. L., Godoy, R. C. B. d., & Evangelista-Barreto, N. S. (2014). Estabilidade físico-química e microbiológica de banana passa orgânica. *Ciência Rural*, 44(10), 1886-1892.
- Caliskan, G., y Dirim, S. N. (2017). Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat Mass Transfer*, 53, 2129-2144.
- Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1291-1297.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2009). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Review in Food Science*, 50, 441-464.
- Farías-Cervantes, V. S., Delgado-Lincoln, E., Solís-Soto, A., Medrano-Roldan, H., & Andrade-González, I. (2016). Effect of spray drying temperature and agave fructans concentration as carrier agent on the quality properties of blackberry powder. *International Journal of Food Engineering*, 12, 451-459.
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., y Albors, A. (2001). *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. Valencia, España: Editorial U.P.V.

- Fitzpatrick, J. J., Iqbal, T., Delaney, C., Twomey, T., & Keogh, M. K. (2004). Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powder with different fat contents. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 435-444.
- Ghaboos, S. H. H., Ardabili, S. M. S., Kashaninejad, M., Asadi, G., y Aalami, M (2016). Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2380-2388.
- Guiné, R.P., Pinho, S., y Barroca, M. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food Bioproducts Processing*, 89, 422-428.
- Hausner, H. H. (1967). Friction conditions in a mass of metal powder. *International Journal of Powder Metallurgy*, 3, 7-13.
- Jinapong, N., Supphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering* 84, 194-205.
- Klava, S., Kampuse, D., Tomsone, L., Kince, T., Ozola, L. (2018). Effect of drying technologies on bioactive compounds maintenance in pumpkin by-products. *Agronomy Research*, 16(4), 1728-1741.
- Levate-Macedo, L., Costa-Vimercati, W., da Silva-Araújo, C., Henriques-Saraiva, S., & Quintão-Teixeira, L. J. (2020). Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. *Journal of Food Process Engineering*, 43(9), e13451. doi: 10.1111/jfpe.13451
- Limpaiboon, K. (2011). Effects of temperature and slice thickness on drying kinetics of pumpkin slices. *Walailak Journal of Science & Technology*, 8(2), 159-166.
- Lund, M. N., & Ray, C. A. (2017). Control of Maillard reactions in foods: Strategies and chemical mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 4537-4552.
- Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57-66.
- Nawirska, A., Figiel, A., Kucharska, A., Sokół-Łetowska, A., Biesiada, A. (2009). Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. *Journal of Food Engineering*, 94, 14-20.
- NC-ISO 2173 (2001). Productos de frutas y vegetales. Determinación del contenido de sólidos solubles. Código refractométrico, Cuba.
- Perez, N. E., y Schmalko, M. E. (2009). Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature. *Journal of Food Processing Engineering*, 32, 88-103.
- Roongruangsri, W., & Bronlund, J. E. (2016). Effect of air-drying temperature on physicochemical, powder properties and sorption characteristics of pumpkin powders. *International Food Research Journal Scimago*, 23(3), 962-972.
- Sadeghi, A., Ebrahimi, M., Raeisi, M., & Ghods-Mofidi, S. M. (2019). Improving the antioxidant capacity of bread rolls by controlled fermentation of rice bran and addition of pumpkin (*Cucurbita pepo*) puree. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 2837-2845.
- Song, X. D., Mujumdar, A. S., Law, C. L., Fang, X. M., Peng, W. J., Deng, L. Z., Wang, J., & Xiao, H. W. (2019). Effect of drying air temperature on drying kinetics, color, carotenoid content, antioxidant capacity and oxidation of fat for lotus pollen. *Drying Technology*, 38(9), 1151-1164.
- Tunde-Akintunde, T. Y., y Ogunlakin, G. O. (2011) Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pre-treated and untreated pumpkin. *Energy Conversion and Management*, 52, 1107-1113.
- Tarwaca, S. N., Karyadi, J. N. W., Nugraheni, N. F., Indrasari, Y. P., Albyan, R., Setiyadi, I., y Ayuni, D. (2021). Effect of various drying methods on the physicochemical characteristics of pumpkin powder. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*, 644, e012080. doi: 10.1088/1755-1315/644/1/012080
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Puente-Díaz, L., López, L., Uribe, E., Rodríguez, K., & Di Scala, K. (2010). Effective moisture diffusivity determination and mathematical

modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresource Technology*, 101(19), 7265-7270.

Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M.M., Barbosa-Cánovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49, 271-289.

Zavalishina, O. M., Kuznetsova, T. A., & Korneeva, A. V. (2021). The results of evaluating the use of vegetable additives in bread production. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 640, e062009. doi: 10.1088/1755-1315/640/6/062009.

CONTRIBUCCION AUTORAL

Claudia Ramírez-Alfonso: Autor principal, diseño, adquisición y procesamiento de datos, escritura del manuscrito.

Aydili Hernández-González: Adquisición y procesamiento de.

Jorge A. Pino: Conceptualización, diseño y revisión final.

José L. Rodríguez: Procesamiento de datos y revisión.

Margarita Núñez de Villavicencio: Análisis estadístico.

Este artículo no presenta conflicto de intereses.