



CINÉTICA DE SECADO Y EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y COMPUESTOS FENÓLICOS DE CHILE JALAPEÑO ROJO (*Capsicum annuum* L.)

DRYING KINETICS AND TEMPERATURE EFFECT ON THE PHYSICAL CHARACTERISTICS AND PHENOLIC COMPOUNDS OF RED JALAPEÑO PEPPER (*Capsicum annuum* L.)

Emilio Alvarez-Parrilla^{1*}, Flor Contreras-Muñiz¹, Joaquín Rodrigo-García², Laura Alejandra de la Rosa¹, Jorge Alberto García-Fajardo³, José Alberto Núñez-Gastélum¹

¹ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Anillo Envoltante del PRONAF y Estocolmo, s/n, C.P. 32315, Cd. Juárez, Chihuahua, México.

² Departamento de Ciencias de la Salud, Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Anillo Envoltante del PRONAF y Estocolmo, s/n, C.P. 32315, Cd. Juárez, Chihuahua, México.

³ CIATEJ, Unidad Noreste, Autopista Monterrey-Aeropuerto km 10. Parque PIIT. Vía de Innovación 404. C.P. 66629, Apodaca, Nuevo León, México.

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el impacto de cuatro diferentes temperaturas de secado sobre las características físicas y contenido de compuestos fenólicos de chile jalapeño rojo. Para ello se determinaron cinéticas de secado para cada temperatura ensayada (55, 65, 75 y 85°C), monitoreando la humedad residual. Así mismo, se evaluó el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides, capacidad antioxidante y perfil de compuestos fenólicos en las muestras por HPLC/MS-ESI-QTOF al inicio y al final de cada proceso de secado. A todas las temperaturas, las cinéticas de secado se ajustaron a los modelos de "Midilli", "Wang" y "logarítmico". El coeficiente efectivo de difusividad fue dependiente de la temperatura, obteniendo una energía de activación de 34.66 KJ/mol. Los parámetros colorimétricos se vieron modificados, reflejando la aparición de un color marrón en las muestras secas. El contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y la capacidad antioxidante no varió durante el proceso de secado. Por HPLC-MS se identificaron 24 compuestos fenólicos: 13 ácidos fenólicos, 2 antocianinas y 9 flavonoides, mismos que se mantuvieron durante el secado.

Palabras clave: Cinética de secado, *Capsicum annuum*, color, compuestos fenólicos, HPLC-MS

ABSTRACT

In this work, we evaluated the effect of four different drying temperatures on the physical characteristics and phenolic compounds content of red jalapeño pepper. For this, drying kinetics were developed at each tested temperature (55, 65, 75 y 85°C), monitoring the residual humidity. In addition, phenolic compounds and flavonoids content, antioxidant capacity and the profile of phenolic compounds by HPLC/MS-ESI-QTOF were determined before and after the drying process. At all tested temperatures, drying kinetics were best fitted to "Midilli", "Wang" and "logarithmic" models. The effective coefficient of diffusion was dependent on temperature, and an activation energy of 34.66 KJ/mol was determined. The colorimetric parameters were modified, reflecting the appearance of a brown color in dried samples.

*Autor para correspondencia: Emilio Alvarez-Parrilla
Correo electrónico: ealvarez@uacj.mx

Recibido: 6 de agosto de 2018

Aceptado: 11 de octubre de 2018

The content of phenolic compounds, flavonoids and anti-oxidant capacity remained unchanged during the drying process. We identified 24 phenolic compounds by HPLC-MS: 13 phenolic acids, 2 anthocyanins and 9 flavonoids, which were maintained during drying.

Keywords: Drying kinetics, *Capsicum annuum*, color, phenolic compounds, HPLC-MS

INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum* L.) ha representado desde tiempos inmemorables un elemento básico de la dieta mexicana, siendo después del tomate el vegetal más demandado en México, con un consumo per cápita de 7-9 kg/año (Alvarez-Parrilla et al., 2011). El estado de Chihuahua es el principal productor de chile a nivel nacional, con una producción promedio de 562000 toneladas en 2017 (SIAP, 2018). El consumo de chile, tanto fresco como procesado, ha ganado importancia, no solamente por sus propiedades sensoriales, sino también por la evidencia científica que relaciona a los capsaicinoides y compuestos fenólicos contenidos en el chile, con una reducción en la mortalidad de los consumidores. Así, un estudio de cohorte que dio seguimiento a más de 270,000 personas durante un período de 19 años, realizado en Estados Unidos, demostró que hubo una reducción del 12% en la mortalidad entre los consumidores habituales de chile en referencia a los no consumidores (Chopa y Littenberg, 2017).

A nivel mundial, cada vez está más extendido el consumo de chiles deshidratados o ahumados como especias y condimentos debido tanto a que los productos deshidratados son menos perecederos que los productos frescos, como a que sus características sensoriales son muy apreciadas por los consumidores (Loizzo et al., 2013; Darvishi et al., 2014; Moreno-Escamilla et al., 2015). Dentro de las técnicas de deshidratación para el secado de chiles se encuentran secado con energía solar, horno de convección o de flujo forzado, infrarrojo, ultrasonido y ahumado. Aunque inicialmente las técnicas de secado se implementaron para incrementar la vida de anaquel de los alimentos, actualmente su aplicación se ha ampliado, debido a que ahora se utilizan para mejorar

las propiedades organolépticas específicas de los chiles. Sin embargo, el proceso de deshidratación puede ocasionar pérdidas en la calidad sensorial y nutricional de los chiles. Estas pérdidas están relacionadas con un cambio en el color, textura y disminución en el contenido de vitaminas y otros compuestos bioactivos (Alvarez-Parrilla et al., 2011; Arslan y Özcan, 2011; Campos-Hernández et al., 2018; Moreno-Escamilla et al., 2015).

Diversos autores han relacionado las pérdidas asociadas a la de calidad de los chiles deshidratados con la temperatura y tiempo de secado (Arslan y Özcan, 2011; Doymaz y İsmail, 2010; Doymaz y Pala, 2002; Vega-Gálvez et al., 2008). Por tal motivo, existe un gran interés por estudiar y describir los procesos cinéticos que rigen el proceso de deshidratación de los chiles, con la finalidad de eficientizar estos procesos para obtener chiles secos de mejor calidad en menores tiempos (Ahmed et al., 2002; Cao et al., 2016; Darvishi et al., 2014; Doymaz y İsmail, 2010; Doymaz y Pala, 2002; Kayman-Ertekin, 2002; Magied y Ali, 2017; Rochín-Wong et al., 2013; Turham y Turjam, 1997; Vega-Gálvez et al., 2008).

Recientemente, nuestro grupo de investigación evaluó el efecto del secado y ahumado desarrollado en un ahumador comercial utilizado por los productores de chile chipotle, sobre la composición química del chile jalapeño rojo durante su transformación en chile chipotle (Moreno-Escamilla et al., 2015). Observamos que el contenido de compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante permaneció prácticamente constante durante todo el proceso de secado. De manera inesperada, el contenido de flavonoides solubles totales permaneció prácticamente sin cambios durante las primeras 48 h, y posteriormente se observó un incremento de 10 veces en el contenido de estos compuestos, en referencia al tiempo cero (control). Resultados similares han sido reportados para el ahumado de chile jalapeño rayado por Campos-Hernández et al. (2018). Sin embargo, todavía se desconoce si éste fenómeno se debe a la temperatura de secado y/o a la presencia de compuestos bioactivos en el humo que podrían difundir hacia el interior del chile, activando la síntesis de flavonoides. Por tal motivo, en el presente estudio se evaluó el impacto de diferentes temperaturas de secado sobre la cinética de secado, características físicas y composición química en chile jalapeño rojo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de muestra y proceso de secado

Las muestras de chile jalapeño rojo (último estado de maduración) fueron donadas en los meses de septiembre-octubre de 2016 por la Asociación de Chipotleros de Camargo, ubicada en la ciudad de Santa Rosalía de Camargo en el Estado de Chihuahua, México. Las muestras fueron transportadas a los laboratorios de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, donde se seleccionaron los chiles utilizando aquellos que no presentaron ninguna alteración ni daño por plagas. Las muestras fueron lavadas en disolución de hipoclorito de sodio 200 ppm, secadas y almacenadas en refrigeración hasta su uso. Se realizó un secado a cuatro

diferentes temperaturas: 55, 65, 75 y 85 °C. Las temperaturas de secado se seleccionaron en función de las temperaturas utilizadas en el secado tradicional de chile chipotle (75°C) y a temperaturas utilizadas en estudios previos por otros autores (Vega-Gálvez et al., 2008; Zhou et al., 2016). Se eligieron al azar 100 chiles para cada temperatura, los cuales fueron secados en un horno de convección (Fisher-Scientific 6965). De cada lote se eligieron aleatoriamente 3 chiles a los cuales se les monitoreó a lo largo del tiempo de secado el color y pérdida de peso. Cada cuatro horas se tomaron muestras aleatorias de cinco chiles que se congelaron a -80 °C (Thermo Scientific EXF32086D), liofilizaron (Labconco Freezone 6), homogenizaron (Nutribullet®) y tamizaron a través de un tamiz de 420 micras (muestras ChL). Por último, las muestras se empacaron en plástico al vacío y fueron almacenadas a -80 °C hasta su posterior análisis. Se realizaron 3 experimentos de secado para cada temperatura y los análisis a los diferentes tiempos de secado se llevaron a cabo por triplicado.

Cinética de deshidratación

Los datos de peso de las muestras de chile a lo largo del proceso de secado se transformaron a fracción de humedad (MR), de acuerdo con la ecuación 1 (Darvishi et al., 2014):

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} \sim \frac{M_t}{M_0}$$

Ecuación 1

Donde M_t , M_0 , y M_e , son el contenido de humedad de las muestras inicial, final y en el equilibrio, respectivamente. Debido a que M_e es relativamente pequeño, se puede simplificar la ecuación. Los datos de MR se ajustaron por métodos no lineales a los modelos cinéticos más utilizados que se presentan en la Tabla 1, utilizando el programa SigmaPlot 12 (Syntat Software, CA, USA).

El mejor modelo se determinó como aquel que presentó el menor valor de *Chi* cuadrada (χ^2) y raíz cuadrada del error al cuadrado (RMSE) de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=0}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{N-n}$$

Ecuación 2

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}$$

Ecuación 3

Donde $MR_{exp,i}$ y $MR_{pred,i}$ son las fracciones de humedad experimentales y calculadas mediante los modelos para cada tiempo i , "N" es el número de datos experimentales y "n" el número de parámetros calculados con cada modelo cinético.

El coeficiente efectivo de difusividad (D_{ef} , m²/s) permite calcular, de acuerdo con la segunda ley de Fick, el proceso de difusión de humedad en el chile durante el proceso de secado, se calcula a partir de la pendiente de la gráfica de ln(MR) frente a tiempo (s), de acuerdo a la ecuación 4 (Cao et al., 2016):

$$m = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2}$$

Ecuación 4

Tabla 1. Valores de las constantes y coeficientes de secado de los modelos cinéticos de secado determinados mediante ajustes no lineales.
Table 1. Values of drying constants and coefficients of the different drying kinetic models determined through non-linear regression.

Modelo	Temperatura	Constantes y coeficientes				Parámetros estadísticos		
Lewis	Temperatura	k			R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	0.0179			0.9402	0.0119	0.1068	
	65 °C	0.037			0.9278	0.0136	0.1126	
	75 °C	0.0409			0.8853	0.0244	0.1507	
Page	Temperatura	k	n		R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	0.0023	1.4801		0.9878	0.0077	0.0837	
	65 °C	0.0385	0.9887		0.9279	0.01467	0.1126	
	75 °C	0.0283	1.1049		0.8887	0.0257	0.1484	
Henderson y Pabis	Temperatura	k	a		R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	0.0201	1.1500		0.9633	0.0077	0.0837	
	65 °C	0.0385	1.0521		0.9305	0.0141	0.1106	
	75 °C	0.0445	1.1174		0.8968	0.0238	0.1429	
Logarítmico	Temperatura	k	a	b	R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	8.50E-03	1.6672	-0.6086	0.9815	0.0019	0.0415	
	65 °C	4.15E-02	1.0769	0.0235	0.9375	0.0084	0.0822	
	75 °C	3.73E-02	1.1728	-0.0549	0.9225	0.0121	0.0975	
Wang	Temperatura	a	b		R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	-0.0139	4.39E-05		0.9831	0.0017	0.0396	
	65 °C	-0.0342	3.00E-04		0.9448	0.0069	0.0772	
	75 °C	-0.0387	4.00E-04		0.9415	0.0084	0.0846	
Midilli y Kucuk	Temperatura	k	a	b	n	R ²	χ ²	RMSE
	55 °C	0.0012	0.9881	6.00E-04	1.6729	0.9893	0.0025	0.0452
	65 °C	0.0019	1.0526	0.0018	1.2772	0.953	0.0113	0.0909
	75 °C	0.0011	1.0114	0.0027	2.2078	0.9717	0.0078	0.0749
Page modificado	Temperatura	k	n		R ²	χ ²	RMSE	
	55 °C	0.0602	1.4801		0.9878	0.0025	0.0482	
	65 °C	0.0371	0.9887		0.9279	0.0146	0.1126	
	75 °C	0.0397	1.1049		0.8887	0.0257	0.1484	
	Temperatura	k	n		R ²	χ ²	RMSE	
	85 °C	0.0569	1.1122		0.9460	0.0132	0.1029	

Donde L es la mitad del diámetro promedio del chile jalapeño en metros (0.0125 m).

Medición de color

Para la medición de color se utilizó el método establecido por Bal et al. (2011), con modificaciones. Durante el proceso de secado por convección, 3 chiles fueron sacados del horno en intervalos de 3 h para la medición de los parámetros L*, a* y b* con un colorímetro (Konika Minolta CR-400). Se realizaron 10 lecturas en diferentes puntos sobre la super-

ficie de cada chile, con los promedios se calcularon L*, a* y b*, éstos a su vez se emplearon para determinar el cambio total de color (ΔE), mediante la ecuación 5.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2}$$

Ecuación 5

Donde L₀, a₀ y b₀ corresponden a los valores en las muestras frescas; mientras que L, a y b a los valores en las muestras secas.

Determinación de los compuestos fenólicos

La determinación de los compuestos fenólicos, para cada una de las muestras obtenidas durante el proceso de secado de los chiles jalapeño rojo, se realizó de acuerdo con la metodología de Moreno-Escamilla *et al.* (2015), con algunas modificaciones. Tres g de ChL de cada tiempo y temperatura de secado se mezclaron con 30 mL de metanol acuoso al 80%, se agitó la mezcla vigorosamente (1 min) y se sonicó durante 30 min. A continuación, se centrifugó (2000 g) durante 30 min a 4 °C, y se recuperó el sobrenadante. El procedimiento se repitió una vez más sobre el precipitado y se mezclaron los dos sobrenadantes. El sobrenadante fue evaporado con un rotoevaporador a 40 °C (Buchi R-3) para eliminar el exceso de metanol. La disolución acuosa remanente se congeló a -80 °C por 24 h y se liofilizó. El extracto obtenido se pesó para determinar el rendimiento de extracción y se almacenó empacado al vacío a -20 °C hasta su posterior análisis.

La determinación de contenido de fenoles solubles totales se realizó mediante el método de reactivo de Folin-Ciocalteu (Alvarez-Parrilla *et al.*, 2011). Para ello, se mezclaron 250 µL de los extractos disueltos en metanol (2 mg/mL) con 1 mL de carbonato de sodio (7.5%) y se dejó reposar durante 3 min, posteriormente se le añadieron 1.25 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (10% en agua) y se incubó a 50 °C por 15 min y se enfrió a temperatura ambiente, en todo momento las muestras se conservaron en obscuridad. Una vez enfriada a disolución, se tomaron 300 µL de cada tubo y se leyó la absorbancia a 760 nm en un lector de microplacas (Bio Rad xMark). Se utilizó ácido gálico como estándar y los resultados se expresaron como mg de equivalentes de ácido gálico por g de chile en peso seco (mg EAG/g PS).

Determinación de flavonoides solubles totales

La determinación de contenido de flavonoides solubles totales se realizó mediante el método de complejación con aluminio (Alvarez-Parrilla *et al.*, 2011). Para ello se mezclaron 31 µL de los extractos disueltos en metanol (2 mg/mL) en un pocillo de una microplaca y se le añadieron 125 µL de agua destilada y 9.3 µL NaNO₂ (5%). Se dejó reposar la mezcla durante 5 min y se agregaron 9.3 µL de AlCl₃ al 10%, transcurridos otros 3 min se le adicionaron 125 µL de NaOH 0.5 M y se incubó a temperatura ambiente por 30 min. La absorbancia de la solución se leyó a 510 nm y catequina fue empleada como estándar. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de catequina por g de chile en peso seco (mg EC/g PS).

Perfil de compuestos fenólicos por cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (HPLC/MS-ESI-QTOF)

La identificación de compuesto fenólicos de los chiles secos obtenidos a diferentes temperaturas se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Pellati *et al.* (2011), con algunas modificaciones. Se prepararon soluciones de los extractos en metanol a una concentración de 2 mg/mL. Se

utilizó un sistema UHPLC Agilent serie 1200 (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) equipado con un desgasificador, auto muestreador, bomba cuaternaria, mismo que estaba acoplado a un sistema de detección de masas (MS) cuadrupolo con tiempo de vuelo (Agilent Technologies 6530). Se utilizó una columna de fase reversa Zorbax eclipse plus C-18 (2.1 x 50 mm) con un tamaño de partícula de 1.8 µm. Las fases móviles consistieron en ácido fórmico (0.1%) en agua (A) y acetonitrilo (B), empleando el siguiente gradiente de elusión: 0-4 min, 90% A, 4-6 min, 70% A, 6-8 min, 62% A, 8-8.5 min, 40% A, 8.5-9.5 min, 90% A. El volumen de inyección fue de 2 µL y el flujo de 0.4 mL/min. El detector de masas cuadrupolo tiempo de vuelo (QTOF, 6530 Accurate Mass QTOF-LC/MS) se utilizó en modo ionización negativa y con una temperatura de gas de 340 °C, flujo de gas secante de 13 L/min, nebulizador a 30 psi. Las condiciones del fragmentador, desespumador y octapolo fueron 175 V, 65V y 750 V, respectivamente. Se colectaron los espectros de masas en un rango de 100 a 1700 m/z. La identificación tentativa de los compuestos usando el programa MassHunter Workstation Qualitative Analysis (Agilent Technologies B.07.00), tomando como criterios de selección tiempo de retención, masa calculada, distribución isotópica y diferencia entre la masa real y calculada menor a 5 ppm, usando como criterio de exclusión una coincidencia menor al 75% (score). Por último, el análisis de los datos se realizó mediante el programa MassHunter Profinder (Agilent Technologies B.08.00), que realiza un análisis quimiométrico que permite identificar los principales compuestos presentes en las muestras (Liang *et al.*, 2016). Una vez identificados los compuestos fenólicos, se utilizó la abundancia del ion molecular para realizar un análisis de la variación en el contenido de cada uno de estos compuestos. Para ello, se utilizó la abundancia del ion molecular del tiempo cero (control) para normalizar los datos de abundancia de las muestras finales a las diferentes temperaturas (abundancia relativa respecto al control).

Determinación de capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de los extractos de las muestras se midió utilizando tres métodos diferentes: DPPH, TEAC y FRAP, siguiendo las técnicas propuestas por Moreno-Escamilla *et al.* (2015). Para el análisis de DPPH se mezclaron 50 µL de muestra con 200 µL de radical DPPH (190 µM en metanol) en la microplaca. La absorbancia se midió a 515 nm durante 10 min en un lector de microplacas. Por su parte, el método TEAC se llevó a cabo usando el radical ABTS. El catión radical se preparó en 50 mL de tampón fosfato salino 0.1 M (PBS, pH 7.4, KCl 0.15 M) mezclando sal ABTS (7 mM, concentración final) con persulfato de potasio (concentración final 2.45 mM). Esta solución se mantuvo en la oscuridad a temperatura ambiente durante 12-16 h antes de su uso. Después de la incubación, la solución ABTS^{•+} se diluyó con PBS para obtener una absorbancia de 0.700 ± 0.01 a 734 nm. Para la reacción, se mezclaron 285 µL de ABTS^{•+} con 12 µL de la muestra, blanco (PBS) o estándar, esta mezcla se midió cada 30 s durante 6 min a 734 nm con un lector de microplacas.

El porcentaje de inhibición para ambos métodos se calculó usando la ecuación 6:

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{(A_b - A_m)}{A_b} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde A_b es la absorbancia del blanco reactivo de DPPH (o ABTS) a los 10 min y A_m es la absorbancia de la muestra con el radical al tiempo indicado. El % Inhibición calculado para cada muestra se comparó con una recta estándar construida con concentraciones conocidas de Trolox.

La capacidad de los extractos para transferir electrones se midió usando la técnica de reducción de hierro (FRAP). Para ello se colocaron 180 μL del reactivo FRAP (tampón de acetato 0.3 M (pH 3.6), 10 mM TPTZ-HCl (2,4,6-tripiridil-s-triazina; 40 mM HCl), y 20 mM de cloruro férrico 10:1:1, v/v/v, calentados a 37 °C durante 30 min) con 24 μL de muestra. La absorbancia se midió a 595 nm cada 60 s durante 30 min. Se realizó una recta con concentraciones conocidas de Trolox para calcular la capacidad de reducción del hierro de las muestras. En todos los casos, los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox por g de muestra seca ($\mu\text{mol ET/g PS}$).

Análisis estadístico

Se realizó un ajuste no lineal de la variación de humedad relativa (MR) a los modelos cinéticos de secado (Tabla 1), mediante el programa SigmaPlot 9.0 (Syntat Software, CA, USA). También se hizo un análisis de varianza de una sola vía, con el programa IBM SPSS Statistics versión 23, para evaluar las diferencias en la concentración de compuestos fenólicos totales, flavonoides, DPPH, FRAP y ABTS entre temperaturas de secado. Por último, se llevó a cabo una prueba *t* de student de una sola vía, para comparar los valores en la concentración inicial y final de compuestos fenólicos totales, flavonoides, DPPH, FRAP y ABTS a cada temperatura de secado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de deshidratación

Las muestras iniciales de chile jalapeño rojo tuvieron un porcentaje de humedad del 86-88%, similar a lo reportado por éste grupo en estudios anteriores durante la producción de chile chipotle (Moreno-Escamilla *et al.*, 2015). Con la finalidad de determinar si el incremento en el contenido de flavonoides durante la producción de chile chipotle, observado en el estudio citado, se debía al estrés térmico o por el ahumado; en este estudio se decidió evaluar el impacto de diferentes temperaturas de secado próximas a la temperatura del proceso industrial del chipotle (65-75 °C). En la Figura 1 se muestran las cinéticas de secado de los chiles a las cuatro temperaturas evaluadas. En general la humedad residual de las muestras después del secado fue del 12-13%. También se observa claramente la influencia de la temperatura sobre el tiempo del proceso; quedando en 105, 60, 54 y 12 h para las temperaturas de 55, 65, 75 y 85 °C, respectivamente. Estos valores finales de humedad fueron mayores a los reportados

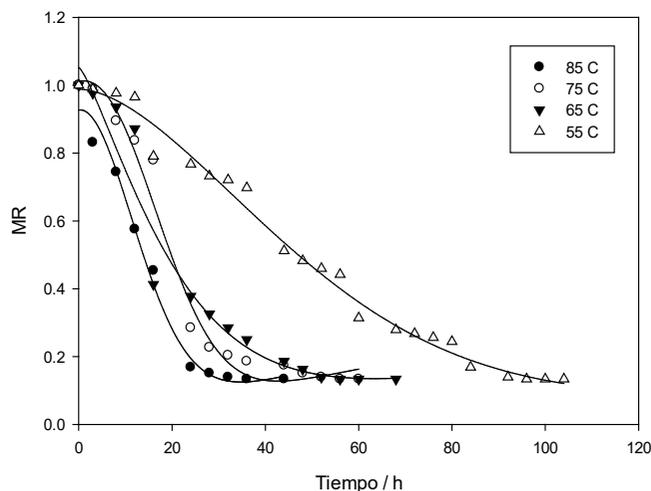


Figura 1. Cinética de secado de las muestras de chile jalapeño rojo a diferentes temperaturas. Los símbolos representan los datos experimentales y las líneas son los ajustes al modelo cinético de Midilli.

Figure 1. Drying kinetics of red jalapeño peppers dried at different temperatures. Symbols represent experimental data and lines are the adjustment to the Midilli kinetic model.

durante la producción de chile chipotle (Moreno-Escamilla *et al.*, 2015) y para chiles secados en horno de convección forzada (Darvishi *et al.*, 2014; Kayman-Ertekin, 2002). Esto puede ser explicado considerando que, al tener un flujo de aire en el interior del horno o una corriente ascendente producida por la combustión, la humedad de equilibrio en el chile se reduce, con lo cual se alcanzan valores de secado mayores. Los resultados de los ajustes a los modelos matemáticos de cinética de secado más utilizados para chile se presentan en la Tabla 1. A partir del análisis de los valores del coeficiente de correlación (R^2), Chi cuadrada (X^2) y raíz cuadrada del error al cuadrado (RMSE), se determinó que los modelos de Midilli, Wang y el logarítmico fueron los que mejor se ajustaron a los datos experimentales. En términos generales, se observó que la constante cinética se incrementó al aumentar la temperatura de secado. Estos resultados coinciden con reportes de cinéticas de secado de chiles bajo diferentes condiciones, tales como: secado solar, por horno de convección forzada, microondas y ultrasonido (Arslan y Özcan, 2011; Darvishi *et al.*, 2014; Doymaz y İsmail, 2010; Doymaz y Pala, 2002; Kayman-Ertekin, 2002; Kucuk *et al.*, 2014).

El valor del coeficiente efectivo de difusividad (D_{eff} m^2/s) varió de 6.32×10^{-9} a 55 °C a 1.90×10^{-8} a 85 °C, indicando que conforme aumentó la temperatura se incrementó el valor de D_{eff} . Estos resultados se encuentran en el rango de los valores reportados para secado de chiles rojos (Cao *et al.*, 2016). A partir de los valores de D_{eff} a las cuatro temperaturas, se determinó la energía de activación (E_a), mediante la ecuación de Arrhenius ($\ln D_{\text{eff}} = \ln A - E_a/RT$), obteniendo un valor de 34.66 kJ/mol, similar a los reportados para chiles rojos variedad Jaranda (E_a 44.0 kJ/mol) (Sanjuán *et al.*, 2003), chiles rojos variedad Conoides (28.40 kJ/mol) (Turham y Turjam, 1997), chiles rojos variedad húngara (40.80 kJ/mol) (Vega-Gálvez *et al.*, 2007) y chiles habaneros rojos (42.67 kJ/mol) (Cao *et al.*, 2016).

Evaluación del color

El color característico del chile jalapeño fresco maduro es una mezcla de tonalidades amarillas y rojas debido a la presencia de carotenoides y degradación de clorofilas (Ahmed *et al.*, 2002; Martínez-Zamora *et al.*, 2016). Los valores iniciales de L* (luminosidad), a* (verde-rojo) y b* (azul-amarillo), fueron 33, 25 y 14, respectivamente, similares a los reportados para otros chiles rojos frescos como paprika (Ahmed *et al.*, 2002), pimienta morrón rojo (Arslan y Özcan, 2011) y chile jalapeño rayado (Campos-Hernández *et al.*, 2018). Durante el secado se observó una disminución del valor de L* hasta 25 para las temperaturas de 55 y 65 °C y 19 para las temperaturas de 75 y 85 °C, lo cual indica una pérdida de luminosidad u oscurecimiento del chile durante el proceso de secado. El parámetro a* disminuyó hasta valores finales de 12-14, probablemente debido a una degradación de los carotenoides (Martínez-Zamora *et al.*, 2016; Moreno-Escamilla *et al.*, 2015). Por su parte, b* disminuyó hasta valores finales de 5-7, posiblemente debido a una degradación de las clorofilas (Martínez-Zamora *et al.*, 2016). En términos generales, estos cambios en los parámetros colorimétricos se ven reflejados en la aparición de un color marrón en las muestras secas. Resultados similares fueron observados para paprika secada tanto al horno como ahumada (Velázquez *et al.*, 2014). Barreiro *et al.* (1997), sugieren que este comportamiento es posible por la degradación de pigmentos termolábiles; también se ha mencionado la influencia de reacciones de azúcares con proteínas que conllevan la formación de productos de Maillard (Campos-Hernández *et al.*, 2018). Lo anterior se confirma al determinar el cambio de color (ΔE) de las muestras al final del secado, se observó que este cambió se incrementó de 14.87 a 55 °C y de 18.90 a 85 °C, indicando que al incrementar la temperatura hubo mayor pérdida de color en las muestras. Estos valores de ΔE fueron superiores en el secado de chiles rojos húngaros a temperaturas entre 50 y 90 °C (Vega-Gálvez *et al.*, 2008); similares a los reportados para el secado de chiles rojos en estufa de convección a temperaturas entre 55 y 70 °C (Campos-Hernández *et al.*, 2018; Martínez-Zamora *et al.*, 2016), e inferiores a los reportados para chile jalapeño ahumado (tipo chipotle) (Campos-Hernández *et al.*, 2018), lo cual parece indicar que el proceso de ahumado produce un mayor efecto en el color de los chiles, posiblemente debido al impacto que tienen compuestos volátiles desprendidos durante la combustión de la madera sobre los componentes de la matriz del alimento.

Fenoles y flavonoides solubles totales

En la Tabla 2 se presentan los valores de compuestos fenólicos solubles totales. En términos generales, los valores de compuestos fenólicos solubles totales se encuentran en el rango de los reportados para chiles rojos (7-20 mg EAG/g) (Campos-Hernández *et al.*, 2018; Magied y Ali, 2017; Moreno-Escamilla *et al.*, 2015; Vega-Gálvez *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2016). Al final del proceso de secado se observó un pequeño decremento en el contenido de compuestos fenólicos solubles totales, que fue menor a 85 °C. Esta menor pérdida en el contenido de compuestos fenólicos a alta temperatura puede explicarse considerando que a altas temperaturas se

Tabla 2. Contenido de fenoles solubles totales y flavonoides solubles totales en chile jalapeño rojo fresco y seco.

Table 2. Total soluble phenols and total soluble flavonoids in fresh and dried red jalapeño pepper.

Temperatura	Fenoles [†]		Flavonoides [‡]	
	Inicio	Final	Inicio	Final
55 °C	16.13±0.03	15.99±0.06*	5.93±0.08	5.67±0.22*
65 °C	15.91±0.15	15.54±0.05*	5.86±0.07	5.56±0.07*
75 °C	15.62±0.27	15.43±0.37	5.65±0.04	5.45±0.08*
85 °C	15.23±0.43	15.21±0.43	5.20±0.26	5.09±0.11

[†]mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/g peso seco (PS), [‡]mg equivalentes de catequina (EC)/ g PS. *Diferencia significativa entre valor inicial y final (p<0.05, n=3).

[†]mg equivalents of gallic acid (EAG)/g dry weight (PS), [‡]mg equivalents of catechin (EC)/ g PS. *Statistical Difference between initial and final values (p<0.05, n=3).

inactivan enzimas como la polifenoloxidasas, responsable de la degradación de compuestos fenólicos, y se destruye la estructura de la pared celular, permitiendo la liberación de compuestos fenólicos ligados (Zhou *et al.*, 2016). Existe discrepancia en referencia al efecto del tipo de secado sobre el contenido de compuestos fenólicos solubles totales. Mientras que algunos autores reportan una disminución de hasta el 50-90 % (Magied y Ali, 2017; Vega-Gálvez *et al.*, 2008; Velázquez *et al.*, 2014), Campos-Hernández *et al.* (2018) observaron un incremento en el contenido de estos compuestos. Dentro de los factores que influyen en la variación en el contenido de compuestos fenólicos en las muestras de chiles secos destacan el tipo de secado (solar y horno) y la temperatura, observando que el secado en horno a altas temperaturas es más efectivo para conservar/incrementar el contenido de compuestos fenólicos.

En general, se observó una ligera disminución (1.9-4.4 %) en el contenido de flavonoides solubles totales (Tabla 2). Los valores de flavonoides encontrados en los chiles frescos (tiempo cero) fueron superiores a los reportados para chile jalapeño rojo (1.16-1.98 mg EC/g) (Campos-Hernández *et al.*, 2018; Moreno-Escamilla *et al.*, 2015), pero en el rango reportado para otros chiles rojos (1-11 mg EC/g) (Loizzo *et al.*, 2015; Rochín-Wong *et al.*, 2013). Rochín-Wong *et al.* (2013), observaron una disminución del 15% en el contenido de flavonoides en chiltepín rojo secado al sol durante un periodo de cuatro días, en comparación al chiltepín rojo fresco. Esto demuestra una vez más que las condiciones de secado pueden tener un efecto determinante sobre el contenido de fitoquímicos en las muestras de chiles secos. Así, los tiempos prolongados necesarios para el secado al sol pueden generar pérdidas en el contenido de fitoquímicos en el chile, el cual también se puede ver favorecido debido a que las bajas temperaturas de secado al sol (aproximadamente 40 °C) no inactivan enzimas como la polifenoloxidasas. Los resultados obtenidos parecen indicar que, en contraste con el secado en horno de convección, durante el proceso de ahumado existe un estrés complementario al térmico que ocasiona que el contenido de flavonoides se incremente considerablemente (aproximadamente 10 veces) en las muestras de chile jalapeño rayado y/o durante la producción de chile chipotle

(Campos-Hernández *et al.*, 2018; Moreno-Escamilla *et al.*, 2015).

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de las muestras al inicio del proceso fue 88-89, 42-45 y 48-49 mmol ET/g para FRAP, ABTS y DPPH, respectivamente. Es bien sabido que la variedad, las condiciones de cultivo, almacenamiento, entre otros; son factores que pueden afectar el contenido de fitoquímicos y capacidad antioxidante de los vegetales. En este caso los valores del presente estudio se encuentran en el rango de algunos reportes (Alvarez-Parrilla *et al.*, 2011; Campos-Hernández *et al.*, 2018) y superiores para otros (Moreno-Escamilla *et al.*, 2015). El proceso de secado ensayado no mostró diferencias significativas entre las muestras en cuanto a la capacidad antioxidante, similar a lo reportado por otros autores (Campos-Hernández *et al.*, 2018; Rochín-Wong *et al.*, 2013). Sin embargo, otros estudios han reportado un incremento de más del

50% en la capacidad antioxidante de chiles rojos después del secado (Arslan y Özcan, 2011; Vega-Gálvez *et al.*, 2008). En contraste, Zhou *et al.* (2016), obtuvieron una reducción de más del 50% en la capacidad antioxidante de chiles rojos después del secado. A pesar de que existen controversias para explicar este comportamiento, se cree que estas diferencias pueden deberse no solamente a cambios en el contenido de fenoles y flavonoides, sino principalmente en el contenido de otros fitoquímicos como capsaicinoides y vitamina C, cuya degradación también ha sido descrita durante el proceso de secado (Alvarez-Parrilla *et al.*, 2011; Campos-Hernández *et al.*, 2018; Moreno-Escamilla *et al.*, 2015).

Perfil de compuestos fenólicos por HPLC/MS-ESI-QTOF

Por último, se procedió a realizar un análisis cualitativo de los principales compuestos fenólicos presentes en las muestras al inicio y al final del secado, mediante HPLC/MS-ESI-QTOF. En la Tabla 3 se presenta el listado de los

Tabla 3. Identificación tentativa y abundancia relativa (respecto al control) de compuestos fenólicos en extractos de chile jalapeño seco (tiempo final de secado) a diferentes temperaturas mediante HPLC/MS-ESI-QTOF.

Table 3. Tentative identification and relative abundance (respect to control) of phenolic compounds in jalapeño peppers dried (at final drying time) at different temperatures, determined by HPLC/MS-ESI-QTOF.

Comp.	TR min	Masa calculada	Formula	Identificación tentativa	Abundancia relativa				
					Control	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C
1	1.791	138.0316	C ₇ H ₆ O ₃	hydroxybenzoic acid (AF)	1	8.72	6.48	nd	nd
2	1.052	154.0259	C ₇ H ₆ O ₄	Dihydroxybenzoic acid (AF)	1	6.73	4.42	4.28	3.10
3	1.076	300.0841	C ₁₃ H ₁₆ O ₈	p-hydrobenzoic acid hexose (AF)	1	0.35	0.85	0.87	0.48
4	3.963	326.0997	C ₁₅ H ₁₈ O ₈	p-coumaroyl hexose (AF)	1	0.70	1.15	1.79	0.97
5	1.946	330.0948	C ₁₄ H ₁₈ O ₉	Vanillic acid hexose (AF)	1	0.23	0.49	0.55	0.59
6	1.863	342.0942	C ₁₅ H ₁₈ O ₉	Caffeoyl-hexose (AF)	1	nd	0.17	0.16	nd
7	3.856	342.0954	C ₁₅ H ₁₈ O ₉	Caffeoyl-hexose 2 (AF)	1	0.94	1.11	0.72	1.07
8	3.006	344.1096	C ₁₈ H ₁₆ O ₇	Caryatin-3-O-methyl ether (AC)	1	0.72	0.83	1.05	0.87
9	3.742	354.0942	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	chlorogenic acid (AF)	1	0.06	0.69	1.10	0.77
10	4.662	356.1095	C ₁₆ H ₂₀ O ₉	Ferulic acid hexose (AF)	1	0.08	0.50	0.14	0.52
11	5.037	386.12	C ₁₇ H ₂₂ O ₁₀	Sinapoyl hexose (AF)	1	0.38	0.56	0.29	0.52
12	6.045	412.1374	C ₁₉ H ₂₄ O ₁₀	Eugenol malonyl hexose (CF)	1	2.33	0.54	0.29	0.49
13	5.47	448.0996	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	Kampferol hexose/Luteolin hexose (FL)	1	0.25	0.66	0.32	0.44
14	6.39	448.0997	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	Kampferol hexose/Luteolin hexose (FL)	1	1.10	0.97	0.25	0.53
15	6.39	484.0763	C ₂₁ H ₂₁ ClO ₁₂	Cyanidin-3-hexose (AC)	1	1.27	1.23	0.34	0.53
16	6.047	522.2078	C ₂₆ H ₃₄ O ₁₁	Isolariciresinol-9- hexose (CF)	1	0.35	0.59	0.64	0.67
17	5.683	564.1475	C ₂₆ H ₂₈ O ₁₄	Apigenin-6-C-glucoside-8-C-arabinoside (FL)	1	0.87	1.04	0.65	nd
18	6.271	580.1422	C ₂₆ H ₂₈ O ₁₅	Luteolin-7-O apiosyl glucoside (FL)	1	1.14	3.05	1.93	1.80
19	6.041	598.1887	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₅	Phloretin-O-3'-5'-Di-C hexose (CF)	1	0.17	1.42	1.47	1.22
20	6.385	646.1297	C ₂₇ H ₃₁ ClO ₁₆	Delphinidin-3-O-rutinoside Cl (Tulipanin) (AC)	1	1.45	1.66	0.73	1.34
21	6.843	666.142	C ₂₉ H ₃₀ O ₁₈	Luteolin-7-O-(2-apiosyl-6-malonyl) hexose (FL)	1	nd	0.49	0.80	nd
22	6.271	742.1947	C ₃₂ H ₄₀ O ₂₀	rutin pentoside (FL)	1	0.61	1.68	0.31	0.98
23	6.214	756.2092	C ₃₃ H ₄₀ O ₂₀	Quercetin-3-O-rhamnosyl-rhamnosyl-glucoside FL)	1	0.35	nd	0.70	1.32
24	6.737	828.1964	C ₃₅ H ₄₀ O ₂₃	Luteolin-7-O-(2-apiofuranosyl-4-glucopyranosyl-6-malonyl)glucopyranoside (FL)	1	0.05	0.36	0.10	nd
Abundancia relativa acumulada					1	0.77	1.01	0.58	0.69

AF: ácido fenólico, AC: antocianina, CF: compuesto fenólico, FL: flavonoide, nd: no detectado.

.AF: phenolic acid, AC: anthocyanin, CF: phenolic compound, FL: flavonoid, nd: not detected.

compuestos fenólicos (ácidos fenólicos y chalconas), antocianinas y flavonoides encontrados en las muestras. En total se identificaron 13 compuestos fenólicos, 2 antocianinas y 9 flavonoides, similar a lo reportado para chiles y pimientos frescos (Jeong et al., 2011; Materska, 2014; Morales-Soto et al., 2013). Se realizó un análisis cualitativo utilizando la abundancia relativa (respecto al control) de cada ion molecular como criterio de análisis (Liang et al., 2016). De estos datos, se puede observar que, si bien algunos de los compuestos se incrementaron después del secado, en términos generales, se observó una disminución de la abundancia a todas las temperaturas, excepto a 65 °C, donde permaneció sin cambio; confirmando el comportamiento de los valores de compuestos fenólicos y flavonoides solubles totales determinados por técnicas espectroscópicas.

Campos-Hernández et al. (2018) realizaron un estudio en el que se determinó el perfil de compuestos fenólicos, mediante cromatografía de líquidos acoplada a masas, durante el secado y ahumado de chile jalapeño rallado, reportaron la aparición de 6 compuestos fenólicos al final del proceso, aun cuando los autores no reportan que compuestos son. Considerando que en el presente estudio no se observó un incremento significativo en la abundancia de compuestos fenólicos, ni la aparición de nuevos compuestos, es posible inferir que el proceso de ahumado favorece la síntesis de compuestos debido a un estrés o a la incorporación de compuestos fenólicos provenientes del humo.

CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto de la temperatura sobre el secado de chile jalapeño rojo, observando que a todas las temperaturas los datos de humedad relativa se ajustan a los modelos cinéticos de Midilli, Wang y el logarítmico. Así mismo, se presenta un cambio de color dependiente de la temperatura indicado por las variaciones en los parámetros L^* , a^* , y b^* . En general, el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y la capacidad antioxidante se mantiene constante en las muestras antes y después del proceso. El perfil de compuestos fenólicos muestra la presencia de 24 compuestos, además confirma el comportamiento de los resultados espectroscópicos de compuestos fenólicos y flavonoides.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT (CB-2011-01-167932) por el financiamiento económico, así como a Víctor Manuel Alcántar Rosales por el apoyo técnico en el manejo del HPLC-MS. Flor Contreras Muñiz agradece a CONACYT la beca de manutención para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias Químico Biológicas.

REFERENCIAS

Ahmed, J., Shivhare, U. S., y Ramaswamy, H. S. 2002. A fraction conversion kinetic model for thermal degradation of color in red chilli puree and paste. *LWT-Food Science and Technology*, 35: 497-503.

- Alvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L. A., Amarowicz, R., y Shahidi, F. 2011. Antioxidant Activity of Fresh and Processed Jalapeño and Serrano Peppers. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 59: 163-173.
- Arslan, D., y Özcan, M. M. 2011. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 504-513.
- Bal, L.M., Kar, A., Satya, S., y Naik, S. N. 2011. Kinetics of colour change of bamboo shoot slices during microwave drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 46: 827-833.
- Barreiro, J. A., Milano, M., y Sandoval, A. J. 1997. Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33: 359-371.
- Campos-Hernández, N., Jaramillo-Flores, M. E., Téllez-Medina, D. I., y Alamilla-Beltrán, L. 2018. Effect of traditional dehydration processing of pepper jalapeno rayado (*Capsicum annuum*) on secondary metabolites with antioxidant activity. *CYTA, Journal of Food*: DOI: 10.1080/19476337.19472017.11406407.
- Cao, Z., Zhou, L., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., Zheng, J., y Li, S. 2016. Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens* L.): a comparative study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96: 3596-3603.
- Carranza, J., y Sánchez, M. 2002. Cinética de secado de *Musa paradisíaca* L. "plátano" y *Manihot esculenta* Grantz "yuca". *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*, 2: 15-25.
- Chopa, M., y Littenberg, B. 2017. The Association of Hot Red Chili Pepper Consumption and Mortality: A Large Population-Based Cohort Study. *PLoS ONE*, 12: e0169876. doi:10.1371/journal.pone.0169876.
- Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., y Khodaei, J. 2014. Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13: 130-138.
- Doymaz, I., e İsmail, O. 2010. Drying and Rehydration Behaviors of Green Bell Peppers. *Food Science and Biotechnology*, 16(6): 1449-1455.
- Doymaz, I., y Pala, M. 2002. Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55: 331-335.
- Jeong, W. Y., Jin, J. S., Cho, Y. A., Lee, J. H., Park, S., Jeong, S. W., Kim, Y., Lim, C., El-Aty, A. M. A., Kim, G., Lee, S. J., Shim, J., y Shin, S. C. 2011. Determination of polyphenols in three *Capsicum annuum* L. (bell pepper) varieties using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry: Their contribution to overall antioxidant and anticancer activity. *Journal of Separation Science*, 34: 2967-2974.
- Kayman-Ertekin, F. 2002. Drying and Rehydrating Kinetics of Green and Red Peppers. *Journal of Food Science*, 67: 168-175.
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., y Dincer, I. 2014. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Drying Technology*, 32: 757-773.
- Liang, N., Liu, Y., Wang, L., Wang, P., Wang, J., y Han, S. 2016. Differentiation of Geographical Origins for Cabernet Sauvignon Wines. A Nontarget Metabolomics Study Using UHPLC-Q-TOF/MS. In A. Technologies (Ed.), *Application Note*, (pp. 1-12). Beijing, China: Agilent Technologies.

- Loizzo, M. R., Pugliese, A., Bonesi, M., Menichini, F., y Tundis, R. 2015. Evaluation of chemical profile and antioxidant activity of twenty cultivars from *Capsicum annuum*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum chacoense* and *Capsicum chinense*: A comparison between fresh and processed peppers. *LWT-Food Science and Technology*, 64: 623-631.
- Magied, M. M. A., y Ali, M. R. 2017. Effect of drying method on physical properties and bioactive compounds of red chili pepper "*Capsicum annuum* L.". *Current Nutrition and Food Science*, 13: 43-49.
- Martínez-Zamora, R., Vega-Peña, G., Díaz-Ovalle, C. O., Altamirano-Romo, S., y Castillo-Borja, F. 2016. Efecto del corte y temperatura de secado en horno convectivo sobre el color del pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 7: 37-46.
- Materska, M. 2014. Bioactive phenolics of fresh and freeze-dried sweet and semi-spicy pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Functional Foods*, 7: 269-277.
- Morales-Soto, A., Gómez-Caravaca, A. M., García-Salas, P., Segura-Carretero, A., y Fernández-Gutiérrez, A. 2013. High-performance liquid chromatography coupled to diode array and electrospray time-of-flight mass spectrometry detectors for a comprehensive characterization of phenolic and other polar compounds in three pepper (*Capsicum annuum* L.) samples. *Food Research International*, 51: 977-984.
- Moreno-Escamilla, J., de la Rosa, L. A., López-Díaz, J. A., Rodrigo-García, J., Nunez-Gastelum, J., y Alvarez-Parrilla, E. 2015. Effect of the smoking process and firewood type in the phytochemical content and antioxidant capacity of red jalapeño pepper during its transformation to chipotle pepper. *Food Research International*, 76: 654-660.
- Pellati, F., Orlandini, G., Pinetti, D., y Benvenuti, S. 2011. HPLC-DAD and HPLC-ESI-MS/MS methods for metabolite profiling of propolis extracts. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 55: 934-948.
- Rochín-Wong, C. S., Gámez-Meza, N., Montoya-Ballesteros, L. C., y Medina-Juárez, L. A. 2013. Efecto de los procesos de secado y encurtido sobre la capacidad antioxidante de los fitoquímicos del chiltepín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12: 227-239.
- Sanjuán, N., Lozano, M., García-Pascual, P., y Mulet, A. 2003. Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83: 697-701.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2018. Avances de siembra y cosecha. Resumen por cultivo. SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do / Accedido 28 de septiembre 2018.
- Turham, M., y Turjam, N. 1997. Drying kinetics of red pepper. *Journal of Food Processing and Preservation*, 21: 209-223.
- Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., y Perez-Won, M. 2008. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117: 647-653.
- Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Yagna, F., Bilbao-Sáinz, C., y Rojas, A. 2007. Mass transfer kinetics during convective drying of red pepper var. hungarian (*Capsicum annuum* L.): Mathematical modeling and evaluation of kinetic parameters. *Journal of Food Process Engineering*, 31: 120-137.
- Velázquez, R., Hernández, A., Martín, A., Aranda, E., Gallardo, G., Bartolomé, T., y Córdoba, M. G. 2014. Quality assessment of commercial paprikas. *International Journal of Food Science and Technology*, 49: 830-839.
- Zhou, L., Cao, Z., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., y Zhou, M. 2016. Degradation kinetics of total phenolic compounds, capsaicinoids and antioxidant activity in red pepper during hot air and infrared drying process. *International Journal of Food Science and Technology*, 51: 842-853.