

Determinación del Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor del Proceso de Escaldado de Zapallo (*Cucurbita maxima*)

Sandra M. Madera, Fabián A. Ortega-Quintana, Emiro A. López* y Omar A. Pérez
Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Alimentos, Grupo de investigación GIPPAL, Carrera 6 No. 76-103, Montería - Córdoba, Colombia.
(e-mail: ealopez@correo.unicordoba.edu.co)

*Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Sep. 2, 2016; Aceptado Nov. 14, 2016; Versión final Feb. 17, 2016, Publicado Jun. 2017

Resumen

Se determina el coeficiente convectivo de calor del escaldado de zapallo (*Cucurbita maxima*) a temperaturas de $70^{\circ}\text{C}\pm 1$, $80^{\circ}\text{C}\pm 1$ y $90^{\circ}\text{C}\pm 1$ y una duración de 320 segundos. La medición de la temperatura del centro geométrico de muestras en forma triangular se realizó con termopares tipo K referencia NIUSB-TC01 (*National Instruments*). Para la solución del modelo matemático se empleó el método de elementos finitos con la ayuda del software COMSOL Multiphysics 3.5. Para determinar el valor del coeficiente convectivo de calor se resolvió un problema de optimización minimizando el error medio relativo entre los valores de temperatura experimentales y temperatura simulados del centro geométrico. Los resultados del coeficiente convectivo fueron 390 ± 17 $\text{W/m}^2\text{C}$ para 70°C , 455 ± 11 $\text{W/m}^2\text{C}$ para 80°C y 535 ± 13 $\text{W/m}^2\text{C}$ para 90°C . Además, los porcentajes del error medio relativo obtenidos se encontraron por debajo del 5%, lo cual indica buena predicción del modelo matemático utilizado.

Palabras clave: transferencia de valor; conducción; convección; escaldado; *Cucurbita maxima*

Determination of the Convective Heat Transfer Coefficient of the Blanching Process of *Cucurbita maxima*

Abstract

The convective heat transfer coefficient of the blanching process of *Curcuma maxima* at different temperatures ($70^{\circ}\text{C}\pm 1$, $80^{\circ}\text{C}\pm 1$ and $90^{\circ}\text{C}\pm 1$) and duration of 320 seconds were determined. The temperature of the geometric center of triangular samples was measured using reference K-type thermocouples NIUSB-TC01 (*National Instruments*). The mathematical model was solved with the finite element method using the software COMSOLTM Multiphysics 3.5. To find the value of the convective heat transfer coefficient an optimization problem was solved by minimizing the relative average error, between the values of the experimental temperature and the simulated temperature of the geometric center. The results of the convective heat transfer coefficient were 390 ± 17 $\text{W/m}^2\text{C}$ to 70°C , 455 ± 11 $\text{W/m}^2\text{C}$ for 80°C and 535 ± 13 $\text{W/m}^2\text{C}$ to 90°C . In addition, the percentages of relative average error obtained are found below 5%, which indicates good accuracy of the mathematical model used.

Keywords: heat transfer; conduction; convection; blanching; *Cucurbita maxima*

INTRODUCCIÓN

El zapallo (*Cucurbita maxima*) es una planta hortícola, perteneciente a la familia de las cucurbitáceas, de gran importancia en el mundo por el alto valor nutritivo del fruto, el cual destaca por su riqueza en carbohidratos, vitamina A y en minerales como potasio y calcio. Según la FAO, en el año 2013 la producción mundial de zapallos y calabazas se desarrolló en una superficie de 1775000 hectáreas, con una producción de 24,3 millones de toneladas. Actualmente, el uso del zapallo se ha enfocado a la elaboración de diversos productos como sopas, cremas, purés, dulces, jugos, tortas y compotas, lo cual implica la aplicación de tratamientos térmicos como el escaldado (Della, 2013). Este proceso demandará un mayor consumo de agua y energía, produciendo un mayor volumen de efluentes y un mayor costo e impacto ambiental si no se lleva a cabo un adecuado control y optimización del proceso, ocasionando problemas relacionados con: i) la calidad sensorial del producto como color, textura y sabor, y ii) con la calidad nutritiva como pérdidas de vitaminas, azúcares y minerales (Arboleda *et al.*, 2010; Augusto *et al.*, 2012; Xin *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2015). El control y optimización adecuados del proceso de escaldado exige el conocimiento de los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), sin embargo, para muchos procesos térmicos no se encuentran disponibles estos valores, ya sea porque no existen investigaciones o porque la irregularidad del alimento exige técnicas muy rigurosas de cálculo (Fricke y Becker 2002; Erdoğan, 2008).

Una metodología muy utilizada para calcular coeficientes convectivos de transferencia de calor entre un fluido y un sólido irregular consiste en aplicar una optimización junto con un modelo matemático de transferencia de calor para la solución del balance de energía. Esta metodología fue utilizada, con excelentes resultados, para calcular coeficientes convectivos de transferencia de calor en sólidos como envases de vidrios irregulares, envases metálicos, huevos y empaques cónicos (Pornchaloempong *et al.*, 2003; Denys *et al.*, 2003; Pornchaloempong *et al.*, 2003; Pinho y Cristianini, 2006; Augusto y Cristiani, 2010; Santana *et al.*, 2011; Augusto *et al.*, 2012). Dentro de esta metodología, el uso del método de los elementos finitos facilita mucho la solución del problema, ya que permite convertir ecuaciones diferenciales parciales a ecuaciones algebraicas a cualquier dominio no importando las irregularidades del alimento. Para esto se utilizan softwares que realicen la tarea de resolver sistemas matriciales muy grandes y en el comercio abundan muchos programas, entre estos está COMSOL Multiphysics, el cual es una plataforma de fácil manejo (Torres y Grau, 2007; Martins, 2006).

Esta investigación tuvo como objetivo determinar del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el escaldado de zapallo. Para lograr este objetivo se realizó un mapeo de la estructura del alimento en COMSOL™ Multiphysics 3.5 (versión evaluación), se ingresaron los modelos matemáticos que describen el proceso de transferencia de calor, se simuló el proceso de escaldado del zapallo plomo empleando dicho software y se realizó la validación del modelo obtenido con el criterio del mínimo error medio relativo entre los datos de temperatura experimentales y los simulados.

METODOLOGÍA

La metodología se presenta en cinco subsecciones: materia prima, proceso de escaldado, modelo de transferencia de calor del proceso de escaldado, simulación del modelo del proceso de escaldado y, por último, validación del modelo.

Materia prima

Se seleccionó el zapallo plomo en estado de madurez comercial teniendo en cuenta la forma, peso y color, y posteriormente se sometió a operaciones preliminares de lavado y secado. Luego, se realizaron cortes de muestra en forma triangular siguiendo las divisiones o fisuras naturales del zapallo como se ilustra en la figura 1. Las medidas de las muestras se reportan en la tabla 1.

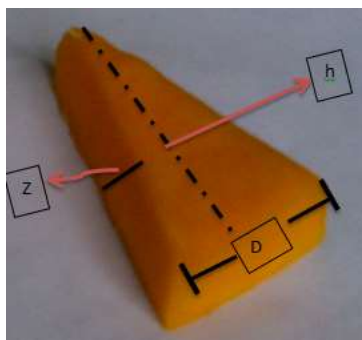


Fig. 1: Corte de la muestra de zapallo

Tabla 1: Dimensiones de las muestras de zapallo

Medidas	Unidades (cm)
Espesor (Z)	1,40±0,04
Altura (h)	4,15±0,05
Base (D)	2,43±0,08

Proceso de escaldado

Se utilizó una escaldadora marca DUPREÉ de 2 litros de capacidad y con control On-Off de temperatura de rango ±1°C. El proceso se llevó a cabo en agua a temperaturas de 70°C, 80°C y 90°C durante un período de 320 segundos. Para medir la temperatura del centro geométrico de las muestras y la temperatura del agua de calentamiento se empleó un sistema de adquisición de datos de National Instruments compuesto de termopares tipo K referencia NIUSB- TC01 conectado a una plataforma de LabVIEW 2012 para el registro y procesamiento de los datos.

Modelo de transferencia de calor del proceso de escaldado

Un modelo matemático basado en la Ley de Fick fue desarrollado para describir la transferencia de calor del proceso de escaldado del zapallo, el cual se describe en las ecuaciones (1)-(3), (Bird *et al.*, 2006).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \tag{1}$$

Con la condición de frontera:

$$k \nabla T = h(T_\infty - T), \text{ para todas las superficies} \tag{2}$$

Y con la condición inicial:

$$T(x,y,z,t=0) = T_0 \tag{3}$$

En la ecn. (1), ρ es la densidad de la muestra (kg/m³), c_p es el calor específico a presión constante de la muestra (J/kg°C), k es la conductividad térmica de la muestra (W/m°C), T es la temperatura de la muestra (°C), T_0 es la temperatura de la muestra a tiempo cero (°C), T_∞ es la temperatura del agua de calentamiento y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m²°C).

Simulación del modelo del proceso de escaldado

La simulación del modelo de transferencia de calor del proceso de escaldado de zapallo se realizó empleando el software COMSOL™ Multiphysics 3.5 (versión evaluación) con cada una de las temperaturas de escaldado. Para esto se llevaron a cabo los siguientes cinco pasos: modelación geométrica, configuración física, generación de la malla, cálculo de la solución y postprocesado y visualización:

Modelación geométrica: Se creó un modelo geométrico de la muestra, el cual se ilustra en la figura 2.

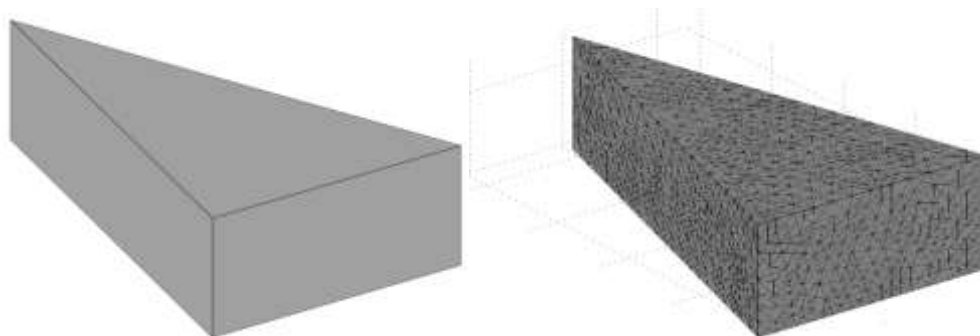


Fig. 2: Modelo geométrico simple y con malla de muestra de zapallo.

Configuración física: Se procedió a cargar el software con las propiedades térmicas del zapallo (densidad, calor específico y conductividad térmica), para esto se utilizaron los modelos propuestos por Choi y Okos (1986) que están en función de la temperatura y de la composición química del zapallo que se muestra en la tabla 2, para obtener estos valores de composición se tomó la media de tres repeticiones. En la tabla 2 los métodos de análisis están indicados con un número superíndice: ¹934.06/96 de la A.O.A.C, ²Método Kjeldahl A.O.A.C/1984, ³extracción Soxhlet A.O.A.C/1984, ⁴ 985.29/96 de la A.O.A.C, ⁵940.26/96 de la A.O.A.C, *se obtuvo por diferencia entre el 100% y la suma de todos los componentes.

Tabla 2: Composición química de 100 g de pulpa de zapallo.

Componente	Cantidad (g)
Humedad ¹	88,5 ±0,20
Proteína ²	0,9 ±0,10
Lípidos ³	0,4 ±0,05
Carbohidratos*	8,2 ±0,13
Fibra ⁴	1,1 ±0,03
Cenizas ⁵	0,9 ±0,05

Generación de la malla: Se creó la malla de elementos finitos (figura 2), la cual es realizada por el software. Esta malla se generó con 25367 elementos.

Cálculo de la solución: El software realiza la solución numérica de las ecuaciones algebraicas arrojando una distribución espacial de temperatura mostrada en la figura 3.

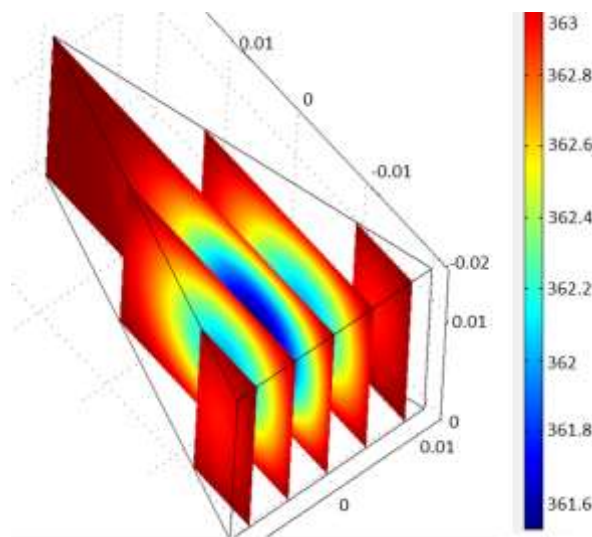


Fig. 3: Distribución de temperatura de la simulación.

Postprocesado y visualización: Finalmente se obtienen los datos simulados de la temperatura del centro geométrico, necesarios para la validación del modelo y cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (figura 4).

Validación del modelo

El modelo matemático fue validado comparando las temperaturas del centro geométrico experimentales con las temperaturas obtenidas por simulación. Estas comparaciones se realizaron teniendo en cuenta el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor que arrojara el mínimo error medio relativo (ecuación 4) al ser reemplazado en el modelo de transferencia de calor definido por las ecuaciones (1)-(3), (Lespinard et al., 2012).

$$\epsilon_{\text{medio}}(\%) = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{T_s - T_e}{T_e} \right) \cdot 100 \tag{4}$$

Donde: T_s es la temperatura simulada del centro geométrico (°C), T_e es la temperatura experimental del centro geométrico (°C). El procedimiento descrito anteriormente se resume en la figura 5.

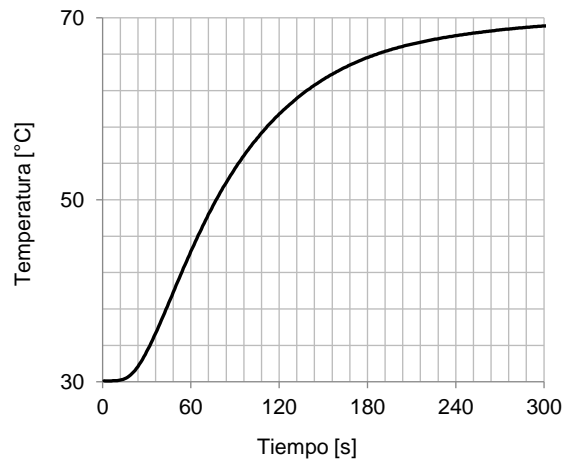


Fig. 4: Temperatura del centro geométrico obtenida por simulación.

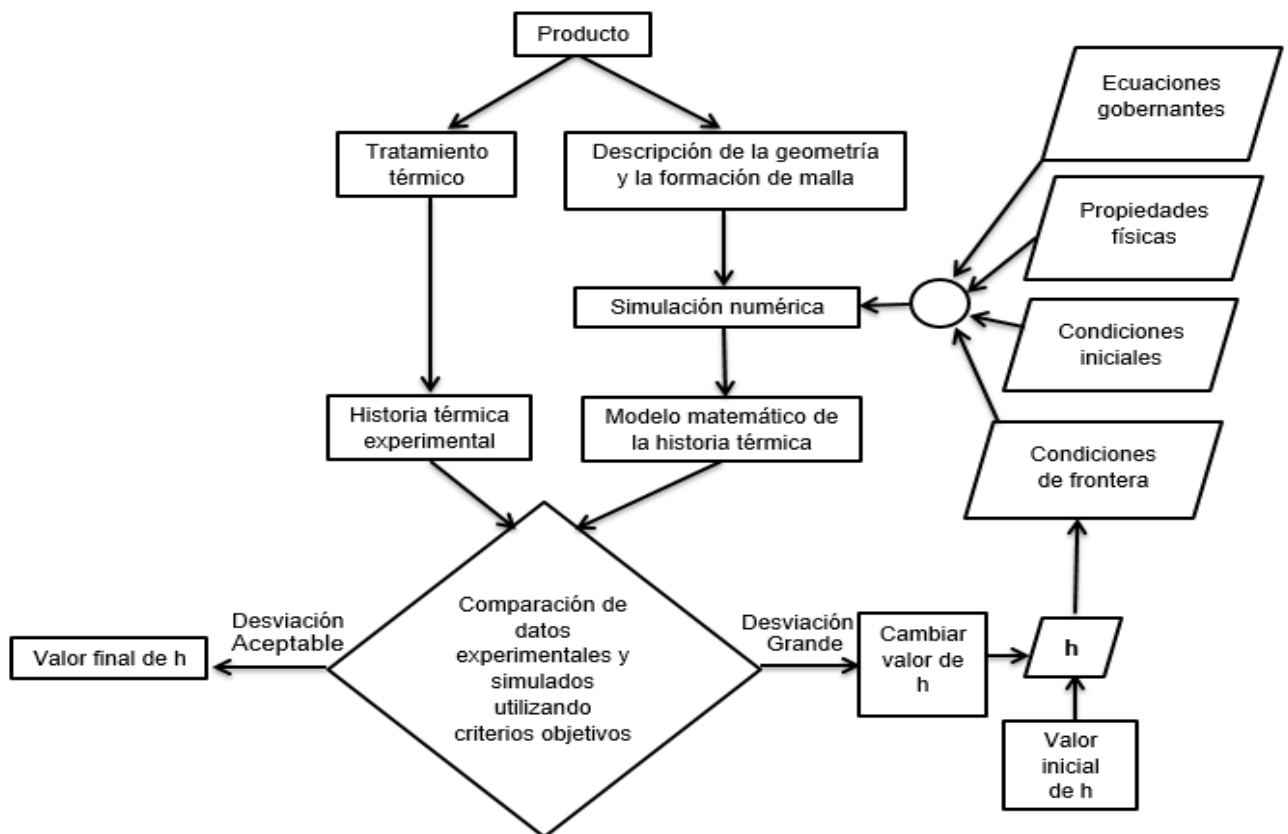


Fig. 5: Estrategia general para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (Adaptada de Cristianini y Duarte, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 6-8 muestran las temperaturas del centro geométrico experimentales y las obtenidas mediante la simulación en COMSOL™ Multiphysics 3.5 (versión evaluación). El comportamiento de los datos experimentales es característico de una ecuación diferencial de segundo orden o de orden superior, ya que al inicio del proceso de escaldado se presenta un tiempo de retardo de calentamiento, que para el caso estudiado es cercano a 5 minutos. Este retardo es característico de los puntos de más difícil acceso del calor en el sólido, lo cual también es evidencia de la correcta ubicación de los medidores de temperatura. Posterior a este retardo se observa la región de calentamiento rápido y finalmente se tiene la región de la temperatura del centro geométrico cercana a la temperatura del medio de calentamiento (Bird *et al.*, 2006).

En estas figuras se observa un buen ajuste del modelo a los datos experimentales, inclusive casi que se alcanza una superposición entre las curvas experimentales y simuladas para una misma condición de tratamiento térmico. Esto evidencia que el modelo planteado posee en su estructura los fenómenos más influyentes del proceso de escaldado, los cuales son la conducción y la convección de transferencia de calor, como lo muestra las ecuaciones (1)-(2). Este comportamiento es similar al observado por Fasina y Fleming (2001) en la evaluación del proceso de escaldado de pepinos a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento térmico, entre 10 y 17 minutos, por Lespinard *et al.* (2007) en escaldado de hongos a temperaturas en el rango de 50 a 90°C por 90 minutos con diferentes tamaños de muestra y por Ortega *et al.* (2011), quienes obtuvieron igual comportamiento al comparar las temperaturas simuladas y las temperaturas experimentales del centro térmico y de la zona entre la corteza y el corazón de la zanahoria durante el escaldado a 85°C por 6 minutos.

El porcentaje (%) de error medio relativo del modelo propuesto, para cada temperatura de agua de escaldado, se muestra en la tabla 3. Estos resultados corroboran que los datos de temperaturas experimentales y temperatura simulados para cada condición de escaldado son similares, lo cual indica un buen ajuste del modelo. Se observa que los valores promedios de % error medio relativo se encuentran en el rango de 0,86%-1,02%, valores que están por debajo del 5%, el cual es un criterio que normalmente se usa en ingeniería para analizar el desempeño de modelos.

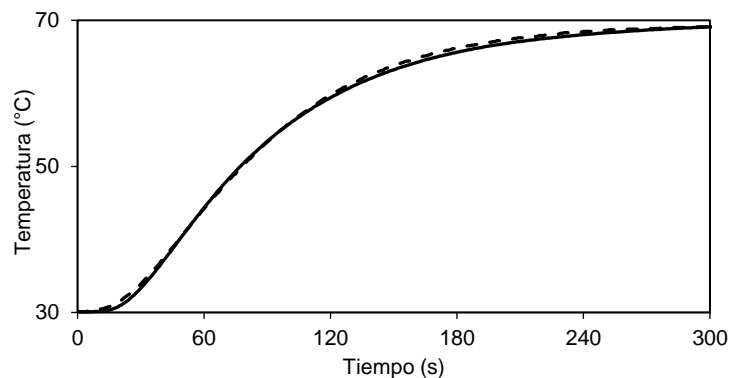


Fig. 6: Perfiles de temperatura experimentales (- -) y simulados (—) a 70 °C.

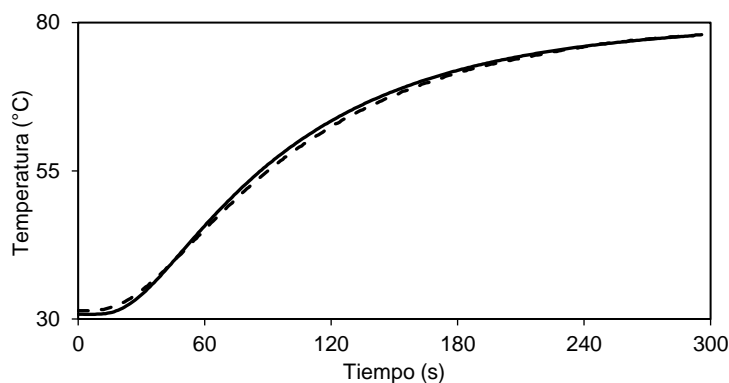


Fig. 7: Perfiles de temperatura experimental (- -) y simulado (—) a 80 °C

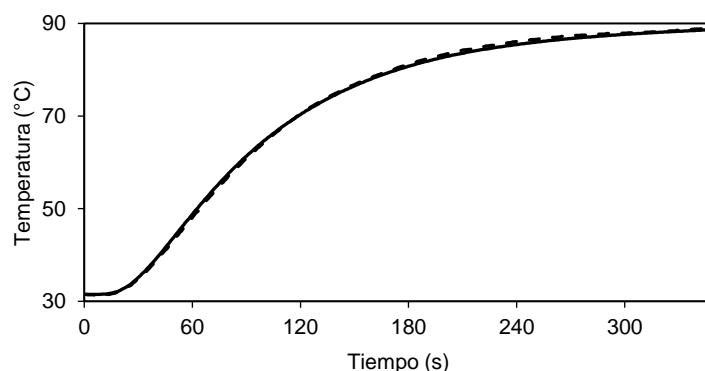


Fig. 8: Perfiles de temperatura experimentales (- -) y simulados (—) a 90 °C

Por otro lado, en la tabla 4 se observa que cuando la temperatura del agua de escaldado aumenta, el coeficiente de transferencia de calor por convección aumenta, debido a que cuando aumenta la temperatura disminuye la viscosidad y disminuye el espesor de la capa límite convectiva, lo cual hace que las fuerzas inerciales tengan más prelación en el sistema y así se mejora con ello la transferencia de calor convectiva (Bird *et al.*, 2006; Iribe-Salazar *et al.*, 2015). Los valores del coeficiente convectivo obtenidos en esta investigación están dentro del mismo orden de magnitud de investigaciones de escaldado similares (Cristianini y Duarte, 2011; Augusto *et al.*, 2012; Iribe-Salazar *et al.*, 2015).

Tabla 3: Porcentaje (%) de error medio relativo de cada temperatura de escaldado

Repeticiones	% error medio relativo		
	70°C	80°C	90°C
Muestra 1	0,61	1,52	0,72
Muestra 2	1,88	1,10	0,94
Muestra 3	0,58	0,45	0,90
Promedio	1,02	1,02	0,86

Tabla 4: Coeficiente convectivo de transferencia de calor para cada temperatura de escaldado

Temperatura de escaldado (°C)	Coeficiente de calor convectivo, <i>h</i> (W/m ² °C)
	Media ± desviación estándar
70	390 ±17
80	455 ±11
90	535 ±13

Los anteriores valores de coeficiente convectivo de calor pueden utilizarse en el cálculo de procesos de escaldado para inactivar las enzimas catalasa y peroxidasa como pretratamiento al secado, a la esterilización, congelación y empacado al vacío del zapallo.

CONCLUSIONES

El modelo matemático de transferencia de calor planteado tuvo un buen ajuste a los datos experimentales de temperatura, indicando que el modelo incluye en su estructura los fenómenos más influyentes del proceso de escaldado (conducción y convección).

Se propuso un modelo matemático de transferencia de calor para el escaldado de zapallo. Este modelo se solucionó empleando COMSOL Multiphysics 3.5 obteniéndose el coeficiente convectivo de transferencia de calor del proceso de escaldado a las temperaturas de agua de calentamiento de 70°C, 80°C y 90°C.

Los porcentajes de error medio relativo entre los valores de temperatura experimentales y los de temperatura simulados se encuentran por debajo del 5%, lo cual indica que el modelo empleado tiene buena capacidad de predicción.

Los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor encontrados en el proceso de escaldado de zapallo están entre 390 y 535 W/m²°C, los cuales pueden utilizarse en el diseño térmico del escaldado de este fruto como pretratamiento a las operaciones de secado, esterilización, congelación y empacado al vacío.

REFERENCIAS

A.O.A.C., Official Methods of Analysis, The Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg, USA (1984)

A.O.A.C., Official Methods of Analysis, The Association of Official Analytical Chemists, Washington, USA (1996)

Arboleda, D. y otros tres autores, Modelo matemático para el proceso térmico de productos cárnicos de geometría cilíndrica, Revista DYNA, 77(164), 301-307 (2010)

Augusto, P., Ferramola, T. y Cristianini, M., Determining convective heat transfer coefficient (h) for heating and cooling of bottles in water immersion, Journal of Food Process Engineering, 35 (1), 54-75 (2012)

- Augusto, P. y Cristianini, M., Computational fluid dynamics analysis of viscosity influence on thermal in-package liquid food process, *International Journal of Food Engineering*, 6(6) (2010)
- Bird, R., Stewart, W. y Lightfoot, E., *Fenómenos de transporte*, 2ª Ed., Editorial Reverté S.A., México D.F., México (2006)
- Choi, Y. y Okos, M., Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods, *Journal of Food Process and Applications*, 1(1), 93-101 (1986)
- Cristianini, M. y Duarte, P., Determining the convective heat transfer coefficient (h) in the thermal process of foods, *International Journal of Food Engineering*, 7(4), 3-4 (2011)
- Della, P., *Manual de cultivo del zapayo anquito (Cucurbita moschata Duch.)*, Editorial Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 9-21, Mendoza, Argentina (2013)
- Denys, S., Pieters, J. y Dewettink, K., Combined CFD and experimental approach for determination of the surface heat transfer coefficient during thermal processing of eggs, *Journal of Food Science*, 68(3), 943-951 (2003)
- Erdoğan, F., A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient, *Journal of Food Engineering*, 86, 453-459 (2008)
- Fasina, O. y Fleming, H., Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching, *Journal of Food Engineering*, 47, 203-210 (2001)
- Fricke, B. y Becker, B., Calculation of heat transfer coefficients for foods, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(6), 731-740 (2002)
- Iribe-Salazar, R. y otros seis autores, Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets, *Journal of Food Science*, 80(12), 2774-2781 (2015)
- Lespinard, A., Goñi, S. y Mascheroni, R., Escaldado de hongos (*Agaricus bisporus*). Simulación por elementos finitos utilizando geometrías 3D, con y sin malla móvil, *Mecánica Computacional*, 25, 3590-3602 (2007)
- Lespinard, A., Bambicha, R. y Mascheroni, R., Quality parameters assessment in kiwi jam during pasteurization. Modelling and Optimization of the thermal process, *Food and Bioproducts*, 90(4), 799-808 (2012)
- Martins, R., Simple finite volumes and finite elements procedures for food quality and safety simulations, *Journal of Food Engineering*, 73(4), 327-338 (2006)
- Ortega, F. y otros tres autores, Modelación y simulación del escaldado de zanahoria por elementos finitos utilizando geometría 3D, *Memorias del II Simposio Internacional y III Nacional Agroalimentario*, 1-6, Montería, Colombia, 1 al 3 de agosto (2011)
- Pinho, C. y Cristianini, M., Método de otimização para determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor em alimentos esterilizados em embalagem de vidro, *Brazilian Journal of Food Technology*, 9(3), 157-163 (2006)
- Pornchaloempong, P. y otros tres autores, Numerical simulation of conduction heating in conically shaped bodies, *Journal of Food Process and Engineering*, 25, 539-550 (2003)
- Santana, F., Augusto, P. y Cristianini M., Determination of the convective heat transfer coefficient (h) in the sterilization of retortable pouches, *International Journal of Food Engineering*, 7(1), 1-14 (2011)
- Torres, R. y Grau, J., *Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics*. Addlink Software Científico S.L., Barcelona, España (2007)
- Xin, Y. y otros cuatro autores, Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review, *International Journal of Refrigeration*, 57, 11-25 (2015)
- Xu, C., Yu, C. y Li, Y., Effect of blanching pretreatment on carrot texture attribute, rheological behavior, and cell structure during cooking process, *LWT-Food Science and Technology*, 62, 48-54 (2015)