

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE ESCALDADO DE MORA CASTILLA (*Rubus glaucus* Benth) POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

DETERMINATION OF COEFFICIENT CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE BLANCHING PROCESS OF “CASTILLA” BLACKBERRY (*Rubus glaucus* Benth) USING THE METHOD OF FINITE ELEMENTS

Yomar Avilez-Montes¹, María Romero-Martínez¹, Fabián A. Ortega-Quintana², Emiro López-Acosta³,
Ómar Pérez-Sierra³

Recibido para publicación: 12 de julio de 2016 - Aceptado para publicación: 19 de agosto 2016

RESUMEN

La transferencia de calor en la mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth), la cual es una baya de aspecto elipsoidal formada por pequeñas drupas adheridas a un receptáculo. Esta fruta presenta un modelo geométrico irregular, para solucionar el modelo matemático de la transferencia de calor de cuerpos irregulares se utilizan los métodos numéricos y uno de los más aplicados es el método de los elementos finitos, el cual divide al objeto en elementos pequeños y así se resuelve el problema planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas en lugar de requerir la solución de las ecuaciones diferenciales complejas, para esto se aplican modelos computacionales integrados a un software. El objetivo de la presente investigación fue determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor h en el proceso de escaldado de la mora Castilla con agua, como fluido de calentamiento, a temperatura de 70°C, 80°C y 90°C. La medición de la temperatura del centro geométrico de las moras Castilla se realizó con termopares tipo K referencia NI USB-TC01 (National Instruments) y la simulación del modelo del proceso de escaldado fue realizada con el software COMSOLTM Multiphysics 3.5 (versión evaluación). El coeficiente convectivo (h) se determinó resolviendo un problema de optimización para encontrar el mínimo error medio relativo absoluto entre la temperatura del centro geométrico experimental y la temperatura del centro geométrico obtenida por simulación del modelo. Los valores obtenidos de h para 70°C, 80°C y 90°C fueron 504,5 W/m²°C, 382,5 W/m²°C y 567 W/m²°C, respectivamente, y el error medio relativo absoluto estuvo entre 0,4% y 3,75%.

PALABRAS CLAVE: escaldado, elementos finitos, coeficiente convectivo, mora Castilla, modelado, simulación.

¹ Ingenieras de Alimentos graduadas en la Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Alimentos. Grupo de investigación GIPPAL. Carrera 6 No. 76-103. Montería - Córdoba, Colombia.

² Fabián A. Ortega Quintana, Estudiante de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Procesos y Energía. Facultad de Minas. Grupo de investigación en Procesos Dinámicos-KALMAN. Carrera 80, Calle 65. Barrio Robledo. Medellín - Antioquia. Colombia.

³ Emiro López-Acosta, Omar Pérez-Sierra, Profesores, Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Alimentos. Grupo de investigación GIPPAL. Carrera 6 No. 76-103. Montería - Córdoba, Colombia.

Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia: ealopez@correo.unicordoba.edu.co

ABSTRACT

The modeling of heat transfer in the “Castilla” blackberry (*Rubus glaucus* Benth), which is a berry of ellipsoidal aspect consists of small drupe attached to a receptacle. This fruit has an irregular geometric model, to solve the mathematical model of heat transfer of irregular bodies, the numerical methods are used and one of the most applied is the finite element method, which divides the object into small elements and so the problem raised is solved as a series simultaneous algebraic equations instead of requiring solving complex differential equations, for this are applied computational models integrated into software. The aim of this research was to determine the convective coefficient heat transfer (h) in the blanching process of “Castilla” blackberry with water as heating fluid at temperatures of 70°C, 80°C and 90°C. The temperature measurement of the geometric center of the samples was performed using type K thermocouples reference NI USB-TC01 (National Instruments) and simulation of the blanching process model was carried out with the COMSOLTM Multiphysics 3.5 software (evaluation version). The heat transfer coefficient (h) was determined by solving an optimization problem to find the minimum mean absolute relative error between the temperature of experimental geometric center and geometric center temperature obtained by simulation model. The values of h to 70°C, 80°C and 90°C were 504,5 W/m²°C, 382,5 W/m²°C and 567 W/m²°C, respectively, and the mean absolute relative error was between 0,4% and 3,75%.

KEYWORDS: Blanching, finite elements, convective coefficient, “Castilla” blackberry, model, simulation

1. INTRODUCCIÓN

La mora Castilla es cultivada en Colombia por su adaptabilidad y características especiales (Mazo et al. 1998). Para la obtención de cada uno de los productos industriales a partir de esta baya es necesario someterla a tratamientos térmicos que garanticen una buena calidad del producto, uno de estos tratamientos térmicos es el escaldado. Normalmente, en la industria alimentaria no se tienen en cuenta la relación óptima de tiempo-temperatura que garantice los costos más bajos del diseño y operación de los equipos para la realización del proceso de escaldado. Para la determinación de esta relación se hace indispensable el estudio del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Para predecir la transferencia de calor entre el fluido de calentamiento y el vegetal a escaldar, la determinación del coeficiente convectivo es uno de los factores claves (Astrom y Bark 1994), el cual es necesario para el cálculo de la velocidad de calentamiento o enfriamiento del alimento, ya que controla la razón de intercambio de calor entre el medio de calentamiento y el producto (Ordoñez y Morales 1996). Además, el coeficiente convectivo es un parámetro importante, ya que es requerido en el diseño, dimensionamiento y control de los equipos de transferencia de calor para el procesamiento de los alimentos (Sablani 2009).

Desafortunadamente, la industria que practica el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor del escaldado de la mora Castilla lo realiza suponiendo que ésta es de forma esférica, si bien es una buena aproximación se corre el riesgo de realizar sobre o subestimados en los tratamientos térmicos, lo cual implica que se esté tratando inadecuadamente a la materia prima con consecuencias drásticas en la calidad del producto final, ya sea, por daño en textura y quemado del producto o por daños que corresponden a enzimas que aún permanecen activas en los procesos posteriores como color, olor, sabor, entre otros (Iribe-Salazar et al. 2015; Jeevitha et al. 2015, Gamboa-Santos et al. 2012; Jaiswal et al. 2012).

A pesar de la complejidad matemática que implica la aplicación de los fenómenos de transferencia de calor por convección y conducción en estado no estacionario en geometrías irregulares, como en el caso de la mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth), la solución de los modelos matemáticos se realiza utilizando métodos numéricos que son resueltos por modelos computacionales comerciales para así determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor con mayor precisión (Incropera, DeWitt 2007).

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor en el proceso de escaldado

de la mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth) con el método de los elementos finitos utilizando el software COMSOLTM Multiphysics 3.5 (versión evaluación).

2. METODOLOGÍA

2.1. Materia prima.

Se utilizaron muestras de mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth) seleccionadas por peso, color y forma. Las moras seleccionadas fueron conservadas a 4°C un día antes de la experimentación. La composición química de la fruta, necesaria para hallar las propiedades térmicas, se obtuvo de INCAP (2012).

2.2. Proceso de escaldado.

Se calentó agua en una escaldadora (Premium modelo PDF302T) hasta alcanzar la temperatura de escaldado requerida ($70 \pm 1^\circ\text{C}$, $80 \pm 1^\circ\text{C}$ y $90 \pm 1^\circ\text{C}$). Posteriormente, las muestras se sumergieron en agua caliente y cada 5 segundos se registró la temperatura del centro térmico de la mora hasta que se logró el equilibrio térmico con el agua de calentamiento. Cada tratamiento experimental se realizó por cuadruplicado.

El registro de tiempo y temperatura de escaldado se realizó empleando un sistema de adquisición de datos conectado a una computadora. La temperatura del centro geométrico de la mora Castilla y del agua de calentamiento se midieron con termopares tipo K referencia NI USB- TC01 (National Instruments).

2.3. Modelo matemático de la transferencia de calor.

Se desarrolló un modelo matemático de transferencia de calor del proceso de escaldado de la mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth) mostrado en las ecuaciones (1)-(3):

Centro térmico:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

Condiciones de frontera:

$$k \nabla T = h(T_\infty - T) \quad (2)$$

Condición inicial:

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (3)$$

Donde:

ρ : Densidad de la mora; C_p : Calor específico de la mora; k : Conductividad térmica; T_∞ : Temperatura de escaldado; T : Temperatura centro térmico; t : tiempo; T_0 : Temperatura Inicial de la muestra.

Solución del modelo matemático propuesto: Empleando el software COMSOL™ Multiphysics 3.5 (versión evaluación), se creó un mapeo de la geometría de la mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth) obteniéndose el modelo geométrico de la baya.

Para crear el modelo geométrico se realizaron seis mediciones de cada una de las moras seleccionadas como se muestra en la Figura 1 y en la Tabla 1, 2 y 3 para cada temperatura.

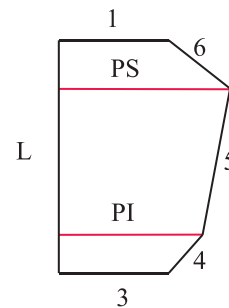


Figura 1. Dimensiones del plano de las muestras usado para las mediciones.

Tabla 1. Mediciones de las muestras para la temperatura de 70°C .

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
Muestra 1	1,62	1,5	0,54	1,9	0,5	0,38	0,95	0,3
Muestra 2	1,74	1,4	0,58	1,88	0,48	0,38	0,94	0,3
Muestra 3	2,06	1,7	0,69	2,01	0,56	0,4	1,01	0,4
Muestra 4	1,76	1,6	0,59	2	0,53	0,4	1	0,4

Tabla 2. Mediciones de las muestras para la temperatura de 80°C.

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
Muestra 1	1,71	1,4	0,57	1,91	0,45	0,38	0,96	0,3
Muestra 2	1,62	1,6	0,54	1,88	0,52	0,38	0,94	0,3
Muestra 3	1,61	1,5	0,537	1,92	0,5	0,38	0,96	0,3
Muestra 4	1,7	1,5	0,567	1,93	0,49	0,39	0,97	0,3

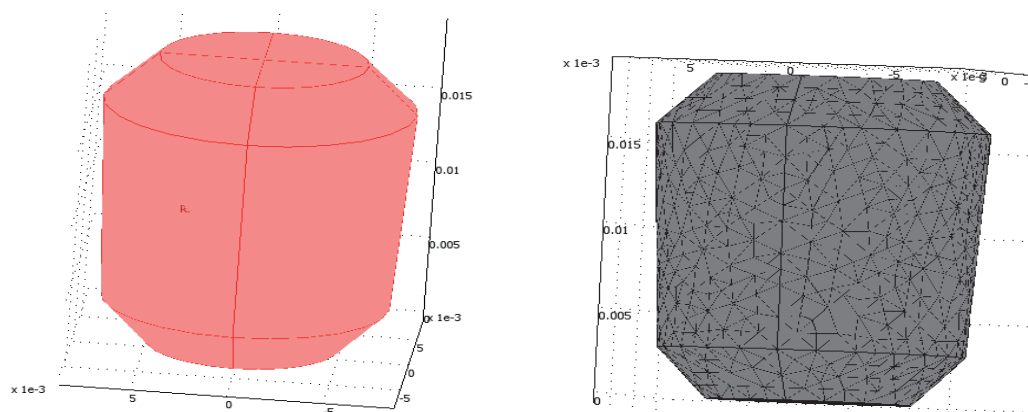
Tabla 3. Mediciones de las muestras para la temperatura de 90°C.

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
Muestra 1	1,84	1,42	0,61	2,03	0,47	0,41	1,02	0,368
Muestra 2	1,77	1,5	0,59	1,87	0,5	0,37	0,94	0,354
Muestra 3	1,95	1,52	0,65	2,09	0,51	0,42	1,05	0,39
Muestra 4	1,85	1,48	0,62	2,06	0,49	0,41	1,03	0,37

El plano mostrado en la Figura 1 es girado sobre el eje L para obtener el objeto mostrado en la Figura 2. Sobre este modelo obtenido se realiza la modelación matemática de transferencia de calor y la simulación con COMSOL.

Posteriormente, se generó la malla del modelo geométrico (ver Figura 2), se adicionó el modelo

físico de transferencia de calor, se adicionaron las condiciones iniciales y las propiedades físicas de la mora Castilla obtenidas a partir del modelo de Choi y Okos (1986) y se resolvieron las ecuaciones del modelo propuesto por el método de elementos finitos, el cual arrojó la temperatura del centro geométrico simulada del proceso de escaldado.

**Figura 2.** Modelo geométrico y enmallado.

2.4. Validación del modelo:

El modelo matemático fue validado comparando las temperaturas obtenidas experimentalmente con las temperaturas simuladas del centro geométrico. Esta comparación se realizó teniendo en cuenta el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor, utilizado para resolver el modelo, que presentó el mínimo error medio relativo absoluto (Ecuación 4).

Para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor se planteó el siguiente problema de optimización:

1. Se declaró la Función Objetivo: se utilizó el error medio absoluto relativo, el cual se minimiza.

$$\varepsilon_{medio} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|T_s - T_e|}{T_e} \quad 4$$

Donde T_s es la temperatura simulada, T_e es la temperatura experimental, ε_{medio} es el error medio absoluto relativo y m es el número de datos de temperaturas experimentales.

2. La variable de decisión fue el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h).
3. Las restricciones del problema de optimización fueron:
 1. Las ecuaciones del modelo matemático, Ecuaciones (1)-(3).

2. Las ecuaciones planteadas por Choi y Okos (1986) para calcular las propiedades de la mora de Castilla.

El problema anterior de optimización se resolvió siguiendo el procedimiento propuesto por Duarte and Cristianini (2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 1-3 muestran las temperaturas del centro geométrico experimental y las temperaturas del centro geométrico simuladas de la mora Castilla escaldada a 70°C, 80°C y 90°C. Los perfiles de temperatura para el centro geométrico durante el escaldado a 70°C, 80°C y 90°C presentaron comportamiento similar a los perfiles térmicos simulados. El "lag" característico que se observa al inicio del calentamiento demuestra la correcta ubicación de los termopares en las diferentes repeticiones.

Por otro lado, en todos los tratamientos, las temperaturas medidas resultaron con un mayor retardo o "lag" que las simuladas, este fenómeno fue también observado por Akterian (1995) quien concluyó que podría deberse a la gran diferencia entre la conductividad térmica (k) y el calor específico (Cp) del termopar y las muestras. A pesar de este "lag" el modelo matemático de transferencia de calor fue muy preciso.

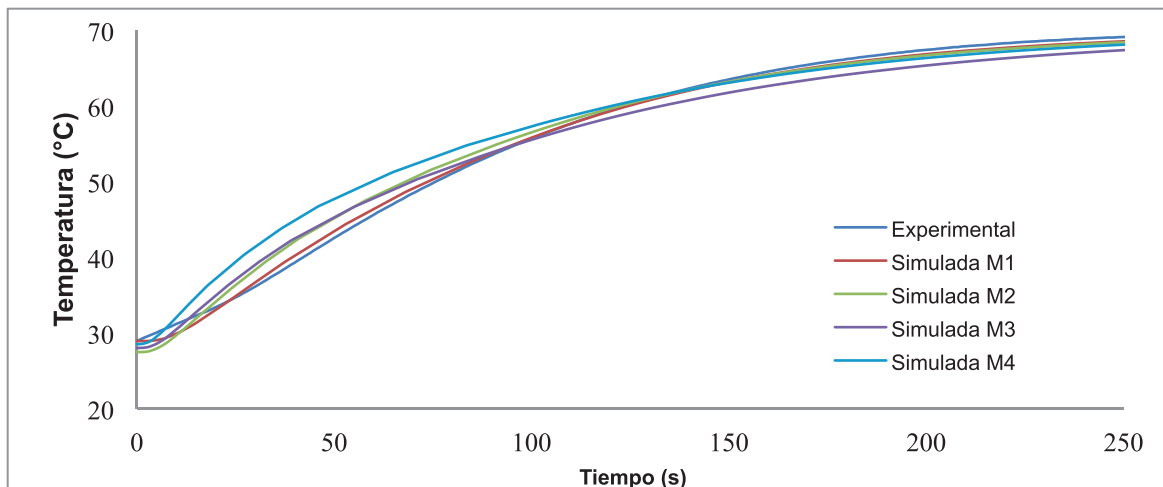


Figura 3. Temperatura experimental y simulada del centro geométrico - escaldado a 70 °C.

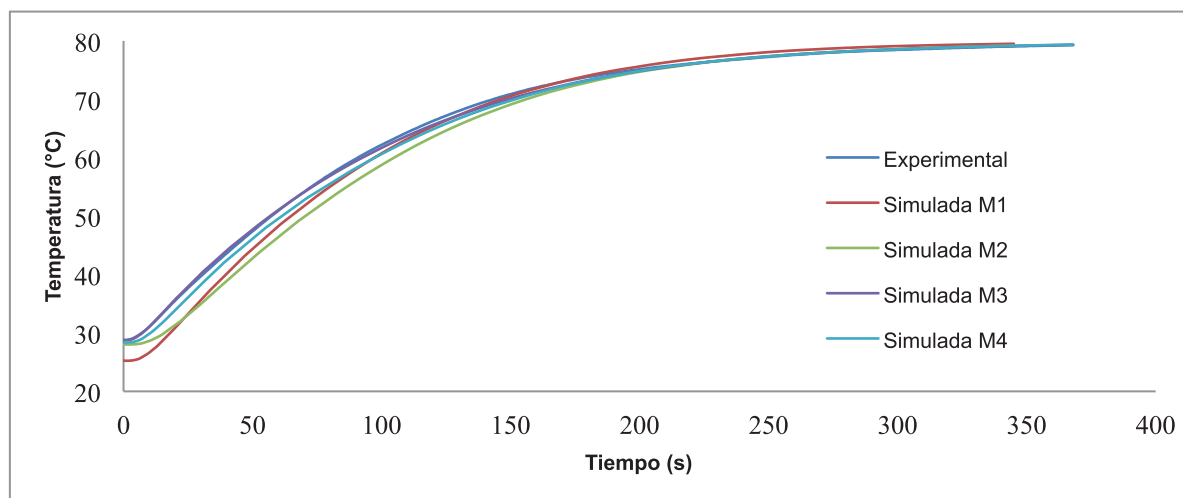


Tabla 4. Temperatura experimental y simulada del centro geométrico - escaldado a 80 °C.

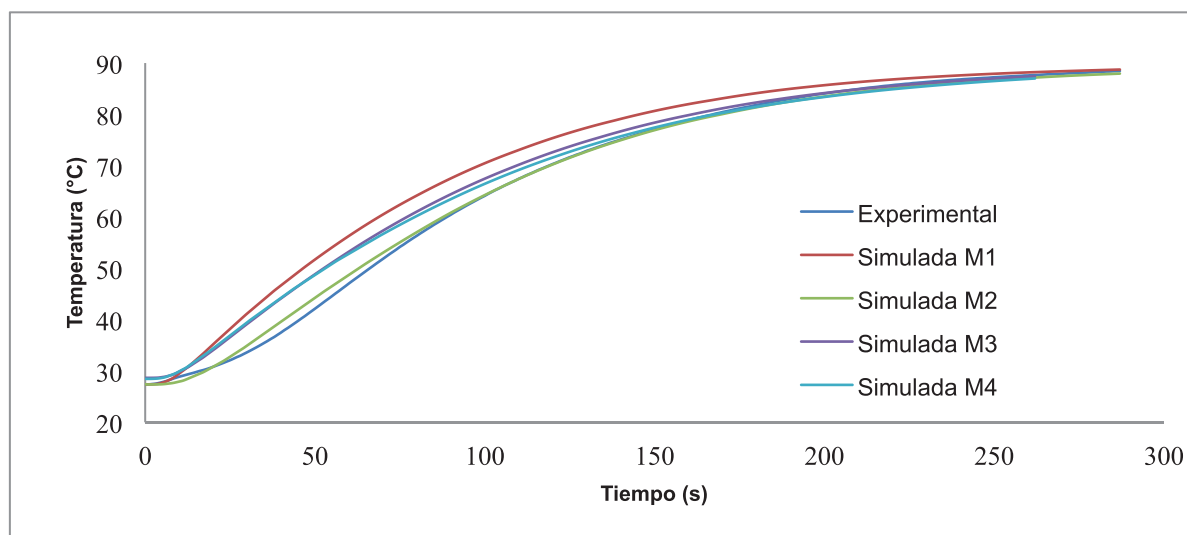


Tabla 5. Temperatura experimental y simulada del centro geométrico - escaldado a 90 °C.

La Tabla 4 muestra los porcentajes del error medio relativo absoluto para cada uno de los coeficientes convectivos de transferencia de calor promedio determinados en cada temperatura de escaldado para las diferentes muestras. Los valores se encuentran en el rango de 0,997% - 3,749%, es decir, menores al 5%, lo cual indica que el valor del coeficiente convectivo es el indicado para resolver el modelo matemático. La desviación estándar de los valores de h indica baja dispersión entre los datos para cada temperatura, lo cual implica que la metodología de optimización dinámica utilizada fue apropiada

para la resolución del proceso de escaldado de mora de Castilla.

Además, la Tabla 4 muestra que el coeficiente de transferencia de calor disminuye a los 80 °C y vuelve a aumentar a la temperatura de 90 °C. Este comportamiento se debe a que a los 70 °C se tiene un proceso transferencia de calor por convección natural y cuando la temperatura de escaldado aumenta a 80 °C se inicia la evaporación del agua de escaldado cerca de las paredes del sólido creándose una película de vapor o de resistencia adicional a la transferencia

Tabla 4. Error medio relativo absoluto del modelo del proceso de escaldado.

	Temperatura de escaldado					
	70°C		80°C		90°C	
Repeticiones	<i>h</i>	% $\square_{\text{medio}}$	<i>h</i>	% $\square_{\text{medio}}$	<i>h</i>	% $\square_{\text{medio}}$
Muestra 1	550	0,997	429	1,521	647	1,175
Muestra 2	473	3,070	408	1,022	469	1,208
Muestra 3	530	2,646	300	0,443	696	2,747
Muestra 4	465	3,436	393	0,396	456	3,746
Promedio	504,5	2,537	382,5	0,846	567	2,219
Desviación Estándar	41,9		56,9		122,4	

de calor que influye en la disminución del valor del coeficiente convectivo. Por otra parte, al aumentar la temperatura de escaldado de 80°C a 90°C, el proceso de ebullición se hace violento dándose una transferencia de calor por convección forzada, lo que favorece el aumento del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Los valores promedios de del coeficiente convectivo de calor para 70, 80 y 90°C son semejantes a los valores determinados por Mendoza y Herrera (2012), quienes evaluaron la cinética de inactivación de la enzima peroxidasa y la cinética del color y textura en tubérculos de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo phureja) sometidos a escaldado mediante agua a 80 y 90°C, encontrándose coeficientes convectivos de transferencia de calor de 214 W/m²°C y 230 W/m²°C.

4. CONCLUSIONES

Los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio para el proceso de escaldado de la mora Castilla a 70°C, 80°C y 90°C fueron 504,5 W/m²°C, 382,5W/m²°C y 567 W/m²°C, respectivamente.

Los datos experimentales de la temperatura del centro geométrico comparados con los datos simulados de la temperatura del centro geométrico no presentaron diferencias significativas.

Los valores del porcentaje de error medio relativo absoluto fueron menores del 5% (entre 0,396%-3,746%) indicando un buen ajuste del modelo a los datos experimentales y un buen valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor en la solución del modelo.

REFERENCIAS

- [1]. Akterian, S. 1995. Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during sterilization process. *Journal of Food Engineering*, Vol 25. 45-53p.
- [2]. Astrom, A. Bark, G. 1994. Heat transfer between fluid and particles in aseptic processing. *Journal Food Engineering*. Vol. 21. 97-125p.
- [3]. Choi, Y. y Okos, M. 1986. Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods. *Journal of Food Process and Applications* 1(1), 93-101.
- [4]. Duarte, P. y Cristianini, M. 2011. Determining the Convective Heat Transfer Coefficient (*h*) in Thermal Process of Foods. *International Journal of Food Engineering* 7(4), art. 15.
- [5]. Incropera, F.P. y DeWitt, D.P. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Sexta edición. Editorial J. Wiley & Sons, New York.
- [6]. Iribe-Salazar, R., Caro-Corrales, J., Hernández-Calderón, O., Zazueta-Niebla, J., Gutiérrez-Dorado, R., Carrasco-Escalante, M. y Vázquez-López, Y. 2015. Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets. *Journal of Food Science* 80(12), 2774-2781.
- [7]. Jaiswal, A., Gupta, S. y Abu-Ghannam, N. 2012. Kinetic evaluation of colour, texture, polyphenols and antioxidant capacity

of Irish York cabbage after blanching treatment. Food Chemistry 131(1), 63-72

- [8]. Jeevitha, G., Hebbar, H. y Raghavarao, K. 2015. Modeling of Peroxidase Inactivation and Temperature Profile during Infrared Blanching of Red Bell Pepper. Journal of Food Processing and Preservation 40(1), 83-93.
- [9]. INCAP. 2012. Tabla de Composición de Alimentos de Centroamérica. Ed. INCAP/OPS. Guatemala.
- [10]. Mazo, J. Rodriguez, D. Echeverri, C. 1998. El cultivo de la mora (*Rubus glaucus* Benth): Principios agroecológicos para su manejo. Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA. Antioquia. Colombia.
- [11]. Mendoza, R. Herrera, A. 2012. Cinética de inactivación de la enzima peroxidasa, color y textura en papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo phureja) sometida a tres condiciones de escaldado. Revista Información Tecnológica. vol 23 n 4. 73-82p
- [12]. Ordoñez, J. Morales, E. 1996. Determinación y evaluación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en procesos continuos de escaldado e hidrogenfriado. Tesis para optar por el título de Licenciado en Ingeniería de Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 154 p.
- [13]. Sablani, S. S. 2009. Measurement of Surface Heat Transfer Coefficient, In Handbook of Food Properties. Second edition M. S. Rahman (Editor). Francis and Taylor Group. 697-716p.