

# MODELADO CINÉTICO DEL COLOR DE CARNES DURANTE LA COCCIÓN

M. M. Ureta<sup>a\*</sup>, L. I. Segura<sup>b</sup>, D. F. Olivera<sup>a,c</sup>, Viviana O. Salvadori<sup>a,b</sup>, Sandro M. Goñi<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CCT-CONICET

La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. 47 y 116, La Plata, Argentina.

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP. 1 y 47, B1900TAG La Plata, Argentina.

<sup>c</sup> Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. 60 y 118, La Plata, Argentina.

E-mail (michaelaureta@gmail.com)

**Resumen.** El color de los productos cárneos es un atributo de calidad primordial, el cual es utilizado por el consumidor como un indicador del grado de cocción de los mismos. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar un software de medición de color como herramienta de monitoreo y a su vez, desarrollar un modelo cinético simple para predecir los cambios de color durante el procesamiento térmico de productos cárneos. Para esto se usaron muestras de carne bovina que fueron sometidas a distintas temperaturas constantes durante tiempos determinados. El color, expresado en el espacio CIEL\*a\*b\*, fue medido utilizando un colorímetro y un sistema de visión computacional, encontrando buena correlación entre ambas medidas experimentales. Los ajustes del modelo propuesto fueron satisfactorios para cada temperatura, dando diferencias de color total  $\Delta E$  inferiores a 2.8. Asimismo el ajuste de todos los datos experimentales (todas las temperaturas ensayadas) fue aceptable, dando una diferencia de color total menor a 4.42. La medición de color mediante el sistema de visión computacional propuesto permitió obtener la variación de color de carne de manera eficiente. A su vez, el modelo cinético propuesto logró predecir satisfactoriamente los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  medidos experimentalmente durante el procesamiento térmico de cortes de carne bovina.

**Palabras clave:** Productos cárneos, cinética de color, tratamiento térmico

## 1. Introducción

El color de los alimentos en general, y de los productos cárneos en particular, es uno de los atributos de calidad más importantes, ya que suele ser uno de los primeros que el consumidor percibe. Típicamente, el color superficial suele ser un indicador de frescura, mientras que el color interno habitualmente se lo asocia al grado de cocción de la carne (Pethare y Roskilly, 2016).

Durante el calentamiento los cambios de color en este tipo de alimentos se deben a diversas reacciones altamente dependientes de la temperatura: desnaturalización de proteínas, evaporación de agua, pardeamiento y carbonización (Nakamura et al., 2011). En particular, la desnaturalización de las proteínas de la carne, provoca aumento de la ternura y la palatabilidad, disminución de la capacidad de retención de agua y cambios en el color (Tornberg, 2005). Respecto a este último, las propiedades ópticas de la carne varían debido a la desnaturalización de la miosina, actina y la actomiosina (Xia et al., 2008), aumentando la dispersión de la luz. Como resultado, al inicio de la cocción la carne se torna “más clara”, fenómeno que puede ser observado por medio de un aumento en la luminosidad instrumental (parámetro  $L^*$  del

---

\*michaelaureta@gmail.com

espacio de color CIELab). Este comportamiento se observa independientemente del origen animal del músculo (pescado, Matsuda et al., 2013; Yu et al., 2014 – cerdo, Lien et al., 2002 – vacuno, Pakula y Stamminger, 2012; Kondjoyan et al., 2014). El calentamiento prolongado produce la gelatinización del colágeno, lo cual disminuye la dispersión de luz y puede disminuir el valor de  $L^*$  (Xia et al., 2008).

En simultáneo a los cambios en luminosidad, la variación del color rojo es crucial para este tipo de productos. Durante el calentamiento, el color de la carne bovina cambia de su color inicial rojo intenso a tonos rosáceos, luego a un color rosa grisáceo, terminando en un color marrón claro (Kondjoyan et al., 2014; AMSA, 2012). Estos cambios, representados fundamentalmente por el parámetro de color  $a^*$ , están asociados a reacciones que ocurren alrededor de 60 °C, luego entre 60 y 70 °C, y, finalmente entre 70 y 80 °C, respectivamente). En este sentido, la desnaturalización de mioglobina es una de las principales reacciones que gobiernan la variación de  $a^*$ , además su estado de oxidación puede tener un efecto notorio en el color, al producir pardeamiento prematuro (Røssvoll et al., 2014; AMSA, 2012), donde un corte parece cocido a temperaturas más bajas que lo normal.

El modelado cinético de estas reacciones ayuda a controlar estos cambios y a desarrollar herramientas de predicción. En este sentido, varios autores han desarrollado modelos cinéticos de variación de color durante el calentamiento, fundamentalmente de carne de pescado. Kong et al. (2007) quienes estudiaron los cambios de color superficial (entre varios indicadores de calidad) durante el procesamiento térmico de salmón, señalaron que la variación consta de dos fases: un blanqueamiento (rápida), seguida de pardeamiento (lento y gradual). Sólo esta última fue modelada utilizando cinéticas de orden 0. Hosseinpour et al. (2012) modelaron el color de camarón durante secado con aire usando cinéticas de orden 0 y 1. Matsuda et al. (2013) modelaron los cambios de luminosidad superficial de besugo rojo de mar durante calentamiento por infrarrojo y por convección usando cinéticas de 1° orden. Solo usaron la fase de pardeamiento y carbonización, descartando la fase de aumento de  $L^*$ . Yu et al. (2014) proponen un modelo de variación del color superficial de besugo rojo de mar durante el grillado. El mismo se basó en el seguimiento de las reacciones de desnaturalización de la actina y la miosina, utilizando cinéticas de 1° orden, con propiedades dependientes de la temperatura, relacionando el color con la fracción no desnaturalizada. En lo que respecta a carne bovina, encontramos el trabajo de Portanguen et al. (2009) quienes emplearon dos cinéticas de 1° orden sucesivas para predecir una primera fase de aumento de la luminosidad, seguida por otra de pardeamiento-oscurecimiento durante el horneado. Pakula y Stamminger (2012) desarrollaron un método de medición del color de la carne (utilizando el espacio de color CIE XYZ) para determinar el grado de cocción. Si bien las mediciones no pudieron reproducir el color real de la carne, los autores proponen que la medición de la luminosidad es suficiente para este fin. Kondjoyan et al. (2014) analizaron la evolución del contenido de agua y del color en relación a la desnaturalización de las proteínas. Los autores también informan dos etapas, blanqueamiento seguido de pardeamiento, las cuales fueron representadas con dos cinéticas sucesivas de primer orden.

En este contexto, los objetivos de este trabajo fueron evaluar un software de medición de color como herramienta de monitoreo y a su vez, desarrollar un modelo cinético simple para predecir los cambios de color durante el procesamiento térmico de productos cárneos, el cual se pueda acoplar a modelos de cocción preexistentes.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Experimental

Para los ensayos, se utilizaron cortes de músculo *semitendinosus* bovino adquiridos en locales comerciales de la ciudad de La Plata, los cuales se refrigeraron a 4 °C por 24hs. Antes del tratamiento térmico se cortaron en láminas de 6 mm de espesor de  $8,2 \pm 0,5$  g (aproximadamente) y se envasaron en bolsas de polietileno (60 $\mu$ ). El calentamiento se realizó por inmersión en un baño termostático (Vicking Masson D, Argentina) a temperatura constante (de 40 a 100 °C). Los ensayos se realizaron durante 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30 y 60 minutos (a temperaturas mayores a 80 °C, el tiempo máximo fue 30 minutos). Una vez transcurrido el tiempo del tratamiento térmico, las muestras se introdujeron en una mezcla agua-hielo durante 30 segundos para detener el mecanismo de cambio de color, se retiraron del envase y se secaron con papel absorbente. El color de la superficie de las muestras se midió usando un sistema de visión computacional (Goñi y Salvadori, 2017), el cual está formado por un gabinete de adquisición de imágenes, un sistema de iluminación, una cámara digital, y un software para procesar la información (Goñi y Salvadori, 2016). El sistema emplea un patrón de color X-Rite ColorChecker (X-Rite Inc., Grand

Rapids, Michigan, USA), el cual permite ajustar un modelo empírico de conversión entre el espacio de color RGB de la cámara, y el espacio de color  $L^*a^*b^*$ . A su vez, se empleó un colorímetro triestímulo (Konica Minolta CR-400, Japón; iluminante D65, apertura 8 mm, observador estándar 2°), de modo de corroborar los valores  $L^*a^*b^*$ . En cada muestra se seleccionaron 4 puntos de ambas caras de la rodaja para la medición. Cada condición de procesamiento ensayada (tiempo-temperatura) fue realizada por duplicado.

## 2.2. Modelo cinético

Aquí se asumirá que el color de una muestra de carne sometida a calentamiento depende únicamente del tiempo y la temperatura, y es expresada como la suma de dos mecanismos independientes (Goñi, 2010):

$$C(t) = C^A(t) + C^D(t) \quad (1)$$

donde  $C$  se refiere a cada uno de los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  o  $b^*$ , y los superíndices  $A$  y  $D$  se refieren al aumento y a la disminución del parámetro, respectivamente. Cada mecanismo es modelado en forma independiente y puede variar en el mismo o distinto sentido. A partir de la revisión bibliográfica y de resultados preliminares, se consideraron conversiones fraccionales de 1° orden para ambos mecanismos, de acuerdo a las Ecs. (2) y (3):

$$C^A(t) = C_\infty^A + (C_0^A - C_\infty^A)e^{-k_A t} \quad (2)$$

$$C^D(t) = C_\infty^D + (C_0^D - C_\infty^D)e^{-k_D t} \quad (3)$$

los subíndices  $0$  y  $\infty$  se refieren a los valores inicial y final, respectivamente, mientras que  $k_A$  y  $k_D$  son las constantes de velocidad de cada mecanismo. Los valores de color a tiempo inicial y final son expresados según la Ec. (4):

$$\begin{cases} C(t=0) = C_0 \\ C(t=\infty) = C_\infty \end{cases} \quad (4)$$

las condiciones iniciales y finales para cada mecanismo se establecen de acuerdo a la Ec. (5):

$$\begin{cases} C^A(t=0) = C_0^A = \alpha C_0 \\ C^D(t=0) = C_0^D = (1 - \alpha)C_0 \\ C^A(t=\infty) = C_\infty^A = \beta C_\infty \\ C^D(t=\infty) = C_\infty^D = (1 - \beta)C_\infty \end{cases} \quad (5)$$

A partir de las ecuaciones (1) a (5), el modelo de variación de color queda expresado en la Ec. 6:

$$C(t) = C_\infty + (\alpha C_0 - \beta C_\infty)e^{-k_A t} + ((1 - \alpha)C_0 - (1 - \beta)C_\infty)e^{-k_D t} \quad (6)$$

Este modelo puede representar satisfactoriamente el comportamiento descrito por varios autores en la literatura especializada en este tipo de alimentos, que consta de dos fases aparentes de variación de color. Los parámetros  $k_A$ ,  $k_D$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $C_\infty$  deben obtenerse por ajuste del modelo a datos experimentales. Las constantes de velocidad se expresaron en función de la temperatura usando relaciones tipo Arrhenius:

$$k_{A \text{ ó } D} = k_{A \text{ ó } D,0} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Los valores de  $C_\infty$  dependen solo de la temperatura, por lo cual se tomaron los valores al tiempo más grande, para cada temperatura, y se ajustaron a expresiones particulares para  $L_\infty^*$ ,  $a_\infty^*$  y  $b_\infty^*$ . Es importante mencionar que el ajuste del modelo a un conjunto de datos particular, puede tener muchas soluciones equivalentes, dependiendo del punto inicial del método de ajuste, por lo cual se realizaron múltiples ajustes para asegurarse de encontrar una solución adecuada. El error del ajuste fue evaluado usando el residuo absoluto promedio (Ec. (8)), y la diferencia de color total  $\Delta E$  (Ec. (9)). Los subíndices “*Exp*” y “*Pred*” se refieren a los valores experimentales y predichos, respectivamente.

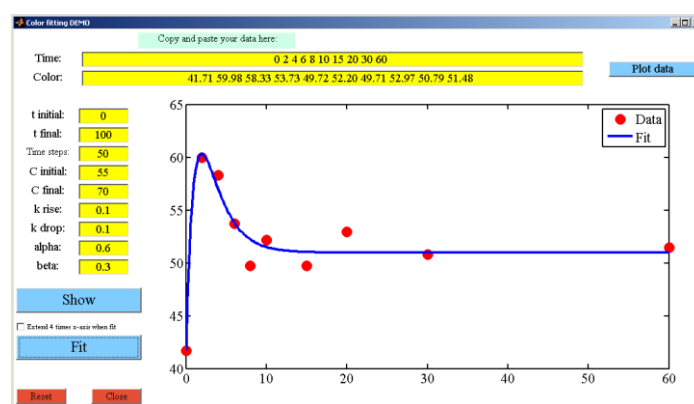
$$|\Delta C| = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |C_{Exp,i} - C_{Pred,i}| \quad (8)$$

$$\Delta E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt{(L_{Exp,i}^* - L_{Pred,i}^*)^2 + (a_{Exp,i}^* - a_{Pred,i}^*)^2 + (b_{Exp,i}^* - b_{Pred,i}^*)^2} \quad (9)$$

Para realizar el ajuste se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB (The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA), la cual permite cargar los datos, visualizarlos y realizar el ajuste.

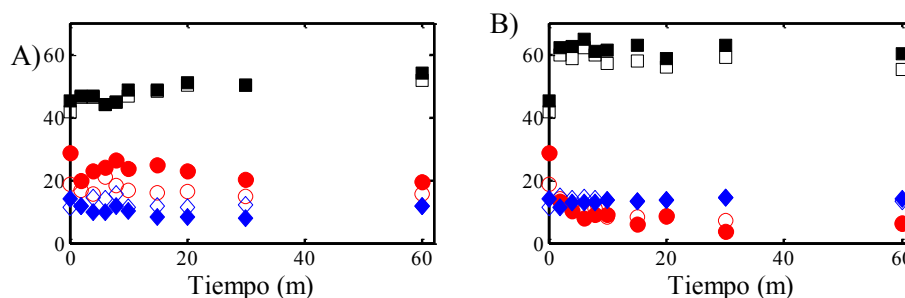
### 3. Resultados y Discusión

En todos los experimentos se registró un aumento de la luminosidad  $L^*$ . Particularmente, en el caso de los tratamientos a 40 y 50 °C el aumento de  $L^*$  fue lento, y su valor se estabilizó a tiempos largos. A temperaturas más altas, el aumento de luminosidad fue mucho más rápido, y luego de alcanzar un valor máximo comienza a disminuir gradualmente, pero sin alcanzar los valores de la muestra cruda. Comportamiento similar al informado por Pakula y Stamminger (2012) y Kondjoyan et al. (2014). La Fig. 1 muestra la interfaz gráfica desarrollada para realizar el ajuste de los datos.



**Fig. 1.** Interfaz gráfica desarrollada para realizar el ajuste de los datos al modelo propuesto. Símbolos: datos de  $L^*$  obtenidos con el colorímetro para el tratamiento a 70 °C; línea continua: ajuste del modelo propuesto.

Los valores del parámetro de color  $a^*$  disminuyeron en todos los tratamientos, hasta alcanzar valores estables, el aumento de la temperatura de operación provocó mayor velocidad de variación. El parámetro, de color  $b^*$ , en general, no presentó grandes variaciones, solo un leve incremento. La Fig. 2 muestra los los parámetros medidos a dos temperaturas diferentes. A 40 °C (Fig. 2.A) se observa una variación gradual de los valores de color y una gran diferencia entre los valores del parámetro de color  $a^*$  obtenidos con el colorímetro y con el sistema de visión computacional. A mayor temperatura de calentamiento (Fig. 2.B, 60 °C) disminuye esta diferencia de valores medidos de  $a^*$  entre ambos métodos, siendo cada vez menos notable a mayores temperaturas de operación. Asimismo, se observa que la mayor parte de la variación de los valores medidos se obtiene durante los primeros 10-15 minutos, por lo cual los experimentos podrían modificarse para reflejar estas observaciones.

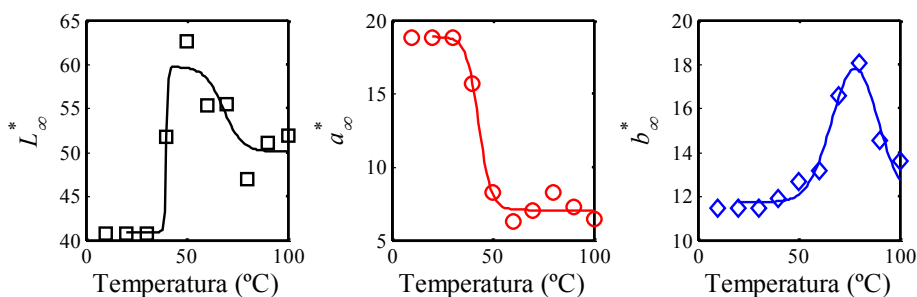


**Fig. 2.** Datos experimentales de  $L^*$  ( $\square$ ),  $a^*$  ( $\circ$ ) y  $b^*$  ( $\diamond$ ) en función del tiempo, para el tratamiento térmico a: A) 40 °C; B) 60 °C. Símbolos vacíos: colorímetro; símbolos llenos: sistema de visión computacional.

Los ajustes individuales para cada temperatura fueron satisfactorios, dando diferencias de color total  $\Delta E$  inferiores a 2.8. La Tabla 1 muestra los valores  $\Delta E$  para cada condición de tratamiento. Asimismo, el coeficiente de correlación entre todo el conjunto de datos experimentales y predichos fue de 0.998 para el colorímetro, y 0.987 a partir de los datos obtenidos de las imágenes. Si bien los ajustes individuales fueron buenos, los valores de los parámetros obtenidos ( $k_I$ ,  $k_D$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $C_\infty$ ), no presentaron una clara tendencia con la temperatura. Para salvar esta situación, se optó por realizar un único ajuste usando todo el conjunto de datos experimentales. En primer lugar, se usaron los datos experimentales obtenidos a largos tiempos de tratamiento para obtener los valores de equilibrio. La Fig. 3 muestra los datos experimentales obtenidos con el colorímetro a tiempos largos, y los ajustes realizados usando ecuaciones empíricas. Estas funciones se alimentan al modelo general para realizar un único ajuste.

**Tabla 1.** Errores del ajuste del modelo a cada serie de datos experimentales (obtenidas mediante colorímetro e imágenes).

Temperatura de tratamiento (°C)	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta E_{\text{colorímetro}}$	1.79	1.56	1.33	1.60	1.25	1.59	1.20
$\Delta E_{\text{imágenes}}$	2.35	2.86	1.55	2.70	1.73	1.84	2.67



**Fig. 3.** Valores de equilibrio de cada parámetro de color  $L^*$  ( $\square$ ),  $a^*$  ( $\circ$ ) y  $b^*$  ( $\diamond$ ). Símbolos: datos experimentales; líneas continuas: modelos empíricos de ajuste.

Para el ajuste de  $L^*$ , para los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se usaron funciones lineales de la temperatura, y para las constantes de velocidad  $k_I$  y  $k_D$  expresiones tipo Arrhenius. Para el ajuste de  $a^*$  y  $b^*$ , se muestran resultados para un modelo cinético usando una única conversión fraccional (Ec. (2)), dado que el modelo completo no mejora sustancialmente los resultados. La Tabla 2 resume los resultados.

**Tabla 2.** Resultados del ajuste para todo el conjunto de datos obtenidos con el colorímetro.

	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Valor inicial	42.35	18.24	11.56
$\alpha$ (T en °C)	$12.41+0.397 \times T$		
$\beta$ (T en °C)	$9.99+0.362 \times T$		
$E_{a,A}$ (kJ/mol)	41.38	50.39	56.42
$k_{A,0}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$1.195 \times 10^6$	$6.740 \times 10^6$	$1.096 \times 10^8$
$E_{a,D}$ (kJ/mol)	34.43		
$k_{D,0}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$9.243 \times 10^4$		

El modelo cinético fue ajustado satisfactoriamente a todo el conjunto de datos experimentales obtenidos con el colorímetro, dando una diferencia absoluta promedio de 1.85, 1.17 y 0.55 para  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente, y una diferencia de color total promedio  $\Delta E = 2.31$ , el cual es aceptable considerando que un cambio de color menor a 2-3 unidades no es discernible por una persona. Para los datos obtenidos a partir de imágenes, el error fue mayor,  $\Delta E = 4.42$ .

#### 4. Conclusiones

La medición de color mediante el sistema de visión computacional propuesto permitió obtener la variación de color de carne de manera eficiente. A su vez, el modelo cinético desarrollado logró predecir satisfactoriamente los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  medidos experimentalmente durante el procesamiento térmico de cortes de carne bovina. Estos resultados están enmarcados en dos líneas de investigación simultáneas. Una de ellas comprende el desarrollo del software de medición de color a partir de imágenes y la evaluación de esta herramienta durante el procesamiento de alimentos en general, mientras que la otra estudia la variación de indicadores de calidad durante el procesamiento de productos cárnicos (en este caso, el color) empleando tratamientos térmicos (método tradicional) y nuevas tecnologías (ultrasonido). En este marco, los resultados presentados en este trabajo son promisorios a los efectos de adaptar el modelo cinético a modelos de cocción previamente desarrollados por el grupo, evaluando otras condiciones operativas (muestras de mayor tamaño y condiciones no isotérmicas).

#### Reconocimientos

Este trabajo se financió con fondos provenientes de la UNLP (11I183), ANPCyT (PICT 2013-1637), y CONICET (PIP-180).

#### Referencias

- AMSA. (2012). Meat Color Measurement Guidelines. American Meat Science Association. <http://www.meatscience.org/publications-resources/printed-publications/amsa-meat-color-measurement-guidelines>. Último acceso: abril de 2017.
- Goñi, S.M. (2010). Simulación y optimización de la cocción de productos cárneos en hornos convectivos, Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Quilmes, Argentina.
- Goñi, S.M., Salvadori, V.O. (2016). CIELAB color measurement from digital images. <https://cidca.quimica.unlp.edu.ar/colorGUI.zip>. Último acceso: mayo de 2017.
- Goñi, S. M., Salvadori, V. O. (2017). Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 538-547.
- Hosseinpour, S., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Aghbashlo, M. (2013). Application of computer vision technique for on-line monitoring of shrimp color changes during drying. *Journal of Food Engineering*, 115, 99-114.
- Kondjoyan, A., Kohler, A., Realini, C. E., Portanguen, S., Kowalski, R., Clerjon, S., Gatellier, P., Chevolleau, S., Bonny, J.-M., Debrauwer, L. (2014). Towards models for the prediction of beef meat quality during cooking. *Meat Science*, 97, 323-331.
- Kong, F., Tang, J., Rasco, B., Crapo, C. (2007). Kinetics of salmon quality changes during thermal processing. *Journal of Food Engineering*, 83, 510-520.
- Lien, R., Hunt, M.C., Anderson, S., Kropf, D.H., Loughin, T.M., Dikeman M.E., Velazco J. (2002). Effects of Endpoint Temperature on the Internal Color of Pork Loin Chops of Different Quality. *Journal of Food Science*, 67, 1007-1010.
- Lowrie, R. A., Ledward, D. A. (2006). Chapter 10. The eating quality of meat. En: Lowrie's meat science. CRC Press, Boca Raton, USA. 7° Ed.
- Matsuda, H., Llave, Y., Fukuoka, M., Sakai, N. (2013). Color changes in fish during grilling - Influences of heat transfer and heating medium on browning color. *Journal of Food Engineering*, 116, 130-137.
- Nakamura, M., Mao, W., Fukuoka, M., Sakai N. (2011). Analysis of the Color Change in Fish during the Grilling Process. *Food Science and Technology Research*, 17, 471-478.
- Pethare, P.B., Roskilly, A.P. (2016). Quality and Energy Evaluation in Meat Cooking. *Food Engineering Review*, 8(4), 435-447.
- Portanguen, S., Lebert, A., Kondjoyan, A. (2009). Effect of animal diet and muscle type on the evolution of the colour of cooked beef meat. 55th International Congress of Meat Science and Technology, Copenhagen, Denmark.
- Røssvoll, E., Sørheim, O., Heir, E., Mørseth, T., Olsen, N. V., Langsrud, S. (2014). Consumer preferences, internal color and reduction of shigatoxigenic Escherichia coli in cooked hamburgers. *Meat Science*, 96, 695-703.
- Tornberg, E. (2005). Effects of heat on meat proteins – Implications on structure and quality of meat products. *Meat Science*, 70, 493-508.
- Xia, J., Weaver, A., Gerrard, D. E., Yao, G. (2008). Heating induced optical property changes in beef muscle. *Journal of Food Engineering*, 84, 75-81.
- Yu, X., Llave, Y., Fukuoka, M., Sakai, N. (2014). Estimation of color changes in fish surface at the beginning of grilling based on the degree of protein denaturation. *Journal of Food Engineering*, 129, 12-20.