

NUEVO MODELO MATEMÁTICO DE CALENTAMIENTO DE LOS GRANOS DE CAFÉ DURANTE EL TOSTADO

ROYNER ABARCA MORA¹; GUILLERMO A. VARGAS-ELÍAS²

¹Ing. Agrícola, UCR, San José, Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola, (506) 8868-4438,
royam90@gmail.com

²Ing. Agrícola. D. Sc. Profesor, CIGRAS-UCR, San José, Costa Rica. (506+) 2511-8820.
gvargase@gmail.com

RESUMEN

El tostado del café es analizado principalmente con modelos basados en transferencia de calor y masa, cuyas soluciones son complejas. Una solución práctica se deriva del calentamiento continuo de los granos; que puede analizarse como la derivada de la temperatura con respecto al tiempo. El objetivo del presente trabajo fue determinar un modelo matemático de calentamiento de los granos de café durante el proceso de torrefacción. Fueron utilizados granos de café *C. arabica*, en masas de 400, 600, 800 y 1000 g y contenido de humedad de 8,73 %b.h. Se utilizó un tostador convencional con quema a gas directo y una temperatura interna de 280 °C. La temperatura de los granos se registró mediante un termómetro infrarrojo sobre la superficie de la masa de los granos. El modelo matemático se definió a partir de la razón de calentamiento de los granos, la cual derivó en una ecuación no lineal con ajuste decreciente exponencial simple con tres parámetros. Las constantes del modelo fueron obtenidas por regresión no lineal para cada masa ($R^2 > 88\%$). Al integrar la ecuación de la razón de calentamiento con los valores iniciales de tiempo y temperatura de los granos, se obtuvo la ecuación que describe el calentamiento de los granos en función del tiempo con coeficiente de determinación mayor que 98,7%. El modelo desarrollado es muy práctico porque además de ajustar adecuadamente la temperatura final de los granos también es sensible a la cantidad de masa colocada en el tostador.

PALABRAS CLAVES: *Coffea arabica*; calentamiento; torrefacción; tostador convencional, cinética del calentamiento.

NEW MODEL OF GRAIN COFFEE TEMPERATURE DURING ROASTING

ABSTRACT

Coffee roasting is mainly analyzed with models based on heat and mass transfer, whose solutions are complex. A practical solution is derived from the continuous heating of the grains; which can be analyzed as the derivative of temperature related to time. The objective of the present work was to determine a mathematical model of heating of coffee beans during the roasting process. *C. arabica* coffee beans were used, in masses of 400, 600, 800 and 1000 g and moisture content of 0.0873 kg kg⁻¹. A conventional roaster with direct gas burning and an internal temperature of 280 °C was used. The temperature of the surface grains was recorded by an infrared thermometer. The mathematical model was defined based on the heating rate of the grains, which resulted in a non-linear equation with a simple exponential decay adjustment with three parameters. The coefficients of the model were obtained by non-linear regression for each mass ($R^2 > 88\%$). By integrating the equation of the heating ratio with the initial values of time and temperature of the grains, the equation described the heating of the grains as a function of time with coefficient of determination greater than 98.7%. The model developed is very practical because in addition to properly adjusting the final temperature of the beans is also sensitive to the amount of mass grains placed in the roaster.

KEYWORDS: *Coffea arabica*; grain heating, roasting; drum roaster, kinetics of temperature.

INTRODUCCIÓN

Las soluciones exactas para el aumento de la temperatura de los granos durante el tostado del café es realizado principalmente con modelos basados en transferencia de calor y masa (Schwartzberg, 2002; Hernández et al., 2007; Bottazzi et al., 2012), las soluciones son complejas para lo cual es necesario sistemas isotérmicos para la transferencia de calor y generar condiciones isotrópicas del sólido, como la uniformidad de temperatura dentro del grano, contenido de humedad y conservación de volumen (Pabis, Jayas y Cenkowski, 1998).

El tostado de café presenta primero cambios físicos como el secado a alta temperatura que libera vapor y mientras supera la temperatura de 180 °C, ocurren reacciones químicas propias de la pirolisis, donde se libera principalmente el CO₂ (Clarke & Macrae; 1987). Para Vargas-Elías (2014), el vapor produce un aumento del volumen en 20 %, mientras que el dióxido de carbono produce un aumento del 60%, por lo tanto, esta expansión volumétrica del 80% aumenta la complejidad del modelaje de la transferencia de calor y masa en el tueste de los granos.

Considerando que el tostador convencional opera en condiciones no isotérmicas y el calentamiento de los granos durante la torrefacción es continuo, se determinó que al inicio del proceso la temperatura de los granos es exponencialmente creciente y después de 2min se mantiene a una tasa linealmente creciente, según Vargas-Elías (2014). Las dos etapas de calentamiento, una exponencial y otra lineal fueron también observadas tanto en café arábica (Vargas-Elías, 2011) como en café robusta (Botelho, 2012).

Una solución práctica es obtener con precisión los datos de temperatura y realizar un ajuste estadístico con respecto a un modelo matemático. Considerando las dos tasas de calentamiento en los granos, el objetivo del presente trabajo fue establecer un modelo matemático basado en la derivada de la temperatura con respecto al tiempo para el proceso de torrefacción del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en el Centro de Investigaciones de Granos y Semillas (CIGRAS), en la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica.

Se utilizó granos de café provenientes del proceso de beneficiado húmedo (*full washing*) con calidad SHB (*Strictly Hard Bean*), de la cosecha 2015-2016, con tamaño de 100% sobre zaranda o criba #15, *Coffea arabica L.* con mezcla de variedades *Caturra* y *Catuai*. El contenido de humedad inicial en base húmeda del café es de $8,73 \pm 0,08$ % b.h. y con densidad aparente de $711,93 \pm 1,80$ kg/m³.

Se utilizaron cuatro masas de 400, 600, 800 y 1000g. Las muestras se colocaron en bolsas plásticas de polietileno y se almacenaron en cámara fría a $10,0 \pm 0,1$ °C. Previo al proceso de la torrefacción, las muestras deben ser retiradas de la cámara por aproximadamente 12 horas hasta equilibrarse térmicamente con el ambiente.

El proceso de torrefacción del café, se realizó en un tostador convencional marca BENDIG y modelo ECO-2000 (Fig.1). El tostador tiene un cilindro rotativo perforador a velocidad constante (60 RPM), calentamiento con quema de gas propano y una capacidad de 2,0 kg de café crudo, según las especificaciones del fabricante. El consumo de gas se mantiene constante mediante un regulador de presión, para garantizar un flujo estable durante todo el proceso. El tostador cuenta con un sistema de enfriamiento con aire a succión y velocidad constante.



Figura 1. Tostador convencional, marca BENDIG / modelo ECO-2000 (Bendig, 2016)

La torrefacción se realizó con cuatro temperaturas iniciales del tostador de 260, 280, 300 y 320°C, las cuales son registradas mediante un termopar tipo K, colocado en la cámara interna del tostador.

La temperatura de la masa de granos y el cilindro rotativo, se utilizó un termómetro infrarrojo portátil, marca General®, que proporciona lecturas desde -32 hasta 1650 °C, con un tiempo

de respuesta de 0,5 s, una precisión de 0,1 °C. Las temperaturas registradas corresponden a la pared interna del cilindro y a la masa de granos en el proceso de tostado, según Figura 2.

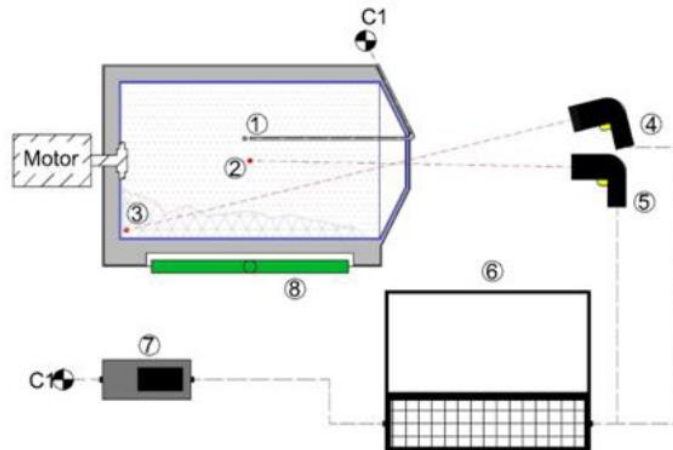


Figura 2. Sistema de adquisición de datos de temperatura para el tostador convencional.

1. Sensor termopar tipo K. 2. Punto de medición en pared de cilindro. 3. Punto medición en masa de granos. 4. Sensor infrarrojo en masa de granos. 5. Sensor infrarrojo en pared del cilindro. 6. Computadora. 7. Sistema de escáner de temperatura. 8. Quemador de gas.

La alta temperatura del tostador garantiza el calentamiento continuo de los granos, el registro de la temperatura y el intervalo de tiempo se relaciona como en la ecuación (1),

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{n+1} - T_n}{t_{n+1} - t_n} = T' \quad (1)$$

Donde, dT/dt es la razón de calentamiento (°C/s); T_{n+1} es la temperatura de la masa de granos en el tiempo $n+1$ (°C); T_n es la temperatura de la masa de granos en el tiempo n (°C)

Las dos etapas de calentamiento en el tueste de los granos se representan como una parte exponencial y otra a tasa constante como en la ecuación (2).

$$\frac{dT}{dt} = y_0 + a \cdot e^{(-b \cdot t)} \quad (2)$$

Integrando la ecuación 2, se obtiene una solución exacta como la ecuación 3, utilizando los parámetros iniciales para $t_0=0$ y $T(t_0)=T_0$.

$$T = T_0 + y_0 \cdot t + \frac{a}{b} \cdot [1 - e^{(-b \cdot t)}] \quad (3)$$

Se utilizó el programa Sigmaplot 13.0 para la determinación de los coeficientes de las ecuaciones por regresión no lineal. El grado de ajuste se analizó a partir del coeficiente de determinación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar el cálculo de la razón de calentamiento en los granos, se procedió a calcular las diferencias de temperatura cada 15s. En la Figura 3, se muestra que efectivamente el ajuste decreciente exponencial simple de tres parámetros puede representar adecuadamente la rapidez del calentamiento entre las bandas de predicción indicadas.

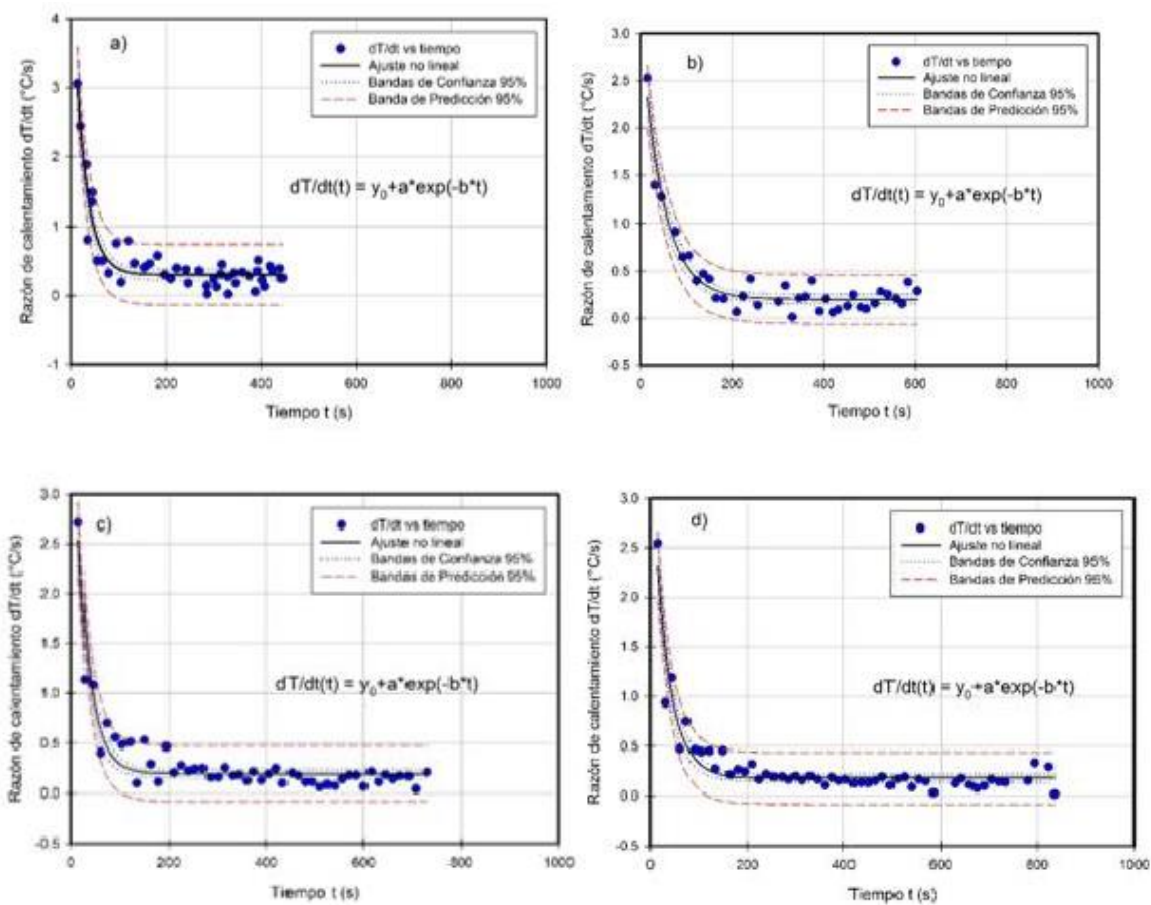


Figura 3. Razón de calentamiento de los granos para masas de 400(a), 600, 800 y 1000 g(d).

El ingreso de los granos a temperatura ambiente aproximadamente a 25°C dentro de la cámara del tostador a 280°C, provocó un incremento significativo de la temperatura en los primeros 120s, tal como fue observado por Vargas-Elías (2014) en masas de 350g.

El final del proceso la tasa de calentamiento se mantiene constante. El efecto de la masa sobre la razón de calentamiento aumentó el tiempo de tostado y disminuyó el ancho de la banda de predicción para el rango de masa de 600 a 1000g.

En el Cuadro 1, se muestran los parámetros respectivos a los ajustes realizados para cada masa evaluada, el coeficiente de determinación (R^2) para todas las masas fue mayor a 88%, los parámetros del modelo y_0 , a y b fueron determinados con un *valor-p* menor que 0,0001.

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las regresiones de cinética de calentamiento.

<i>Masa</i>		<i>400 g</i>	<i>600 g</i>	<i>800 g</i>	<i>1000 g</i>
Coeficientes del modelo	y_0 ($^{\circ}C/s$)	0,3065	0,2011	0,1974	0,1797
	a ($^{\circ}C/s$)	4,7980	2,9076	4,1014	3,2708
	b (s^{-1})	0,0404	0,0209	0,0374	0,0307
Valores estadísticos del ajuste	R	0,9402	0,9673	0,9481	0,9458
	R^2	0,8840	0,9357	0,8989	0,8944
	$Adj.R^2$	0,8783	0,9318	0,8944	0,8900
	SE	0,2137	0,1252	0,1370	0,1283
Prueba- t	y_0	8,3231	7,9954	9,1926	9,1056
	A	8,7104	14,3228	10,2507	11,6258
	B	8,5543	10,2450	9,4683	9,7888

El coeficiente y_0 representa la condición de tasa constante de calentamiento al final del proceso, el cual disminuye proporcionalmente con respecto al aumento de masa. Es decir, cuando se aumenta la masa en el tostador el cambio de la temperatura de los granos es más lento; por lo tanto dura más el proceso.

La desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) fue menor al 0,14%, lo que demuestra que el modelo fue adecuado para representar tanto la rapidez como el efecto de la masa sobre la tasa de calentamiento.

En la Figura 4, se muestra el calentamiento continuo de la masa de granos observado y la línea continua representa el valor según el modelo matemático propuesto. La condición inicial de temperatura (T_0) en la masa de granos verdes fue $24,7^{\circ}C$. Se observa que para la menor masa el proceso fue más rápido y que la tasa de calentamiento disminuye con el aumento de la masa. El modelo matemático efectivamente logra adaptarse al efecto de la masa en el tiempo y en el calentamiento.

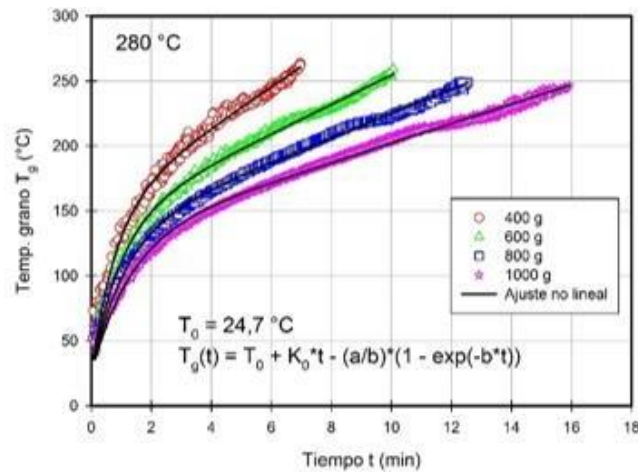


Figura 4. Cinética de la temperatura de los granos de café tostado a 280 °C.

En el Cuadro 2, se observan los parámetros del ajuste del modelo para cada masa, además, el coeficiente de correlación (R^2) para todas las masas fue mayor a 98%, los parámetros del modelo y_0 , a y b fueron determinados con un *valor-p* menor que 0,0001. Los coeficientes presentaron una relación proporcionalmente decreciente con el aumento de la masa de granos.

Cuadro 2. Parámetros estadísticos de las regresiones de cinética de calentamiento.

<i>Masa</i>		400 g	600 g	800 g	1000 g
Coeficiente s del modelo	y_0 (°C/s)	15,7492	11,3073	9,3319	7,4484
	a (°C/s)	-	-	-96,9938	-80,0694
	b (s^{-1})	1,2170	1,0210	0,9068	0,7761
Valores estadísticos del ajuste	R	0,9938	0,9973	0,9976	0,9982
	R^2	0,9876	0,9947	0,9953	0,9963
	$Adj.R^2$	0,9876	0,9947	0,9953	0,9963
	SE	5,2232	3,2930	3,2303	2,7967
Prueba- <i>t</i>	y_0	54,8872	111,1684	158,5880	182,2626
	A	-54,9997	-93,0161	-	-115,0170
	B	36,9979	65,8154	82,7386	86,7013

La desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) fue menor al 5,5%, lo que demuestra que representa adecuadamente el calentamiento de los granos en las masas estudiadas.

El modelo de temperatura propuesto, presentó un ajuste general (R^2) superior a 98,7%. El final del proceso es relevante porque se determina el tipo de tueste en los granos en función de su temperatura, se observa que el modelo propuesto efectivamente representa los valores observados en la etapa final, lo cual fue observado en otros tostadores (Schwartzberg, 2002).

CONCLUSIONES

El modelo se ajustó adecuadamente para los datos de calentamiento de la masa de granos de café durante la torrefacción y efectivamente aproxima la temperatura final de los granos.

La masa colocada en el interior del tostador afectó significativamente la velocidad de calentamiento de la masa de granos, esta velocidad se compone de dos etapas, la primera, en la que sucede un calentamiento brusco y la segunda, después de un punto de inflexión con tasa constante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abarca Mora, R. (2017). Estudio del proceso de torrefacción del café en tostador convencional (Tesis de Licenciatura). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica. 106p.

Bendig. (15 de noviembre de 2016). Torrefacción-Tostadores. Obtenido de Bendig Maquinaria S.A.: www.bendig.co.cr

Clarke, R. J., & Macrae, R. (1987). Coffee, Volumen 2, Technology. Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG11 8JU, England: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD.

Bottazzi et al. (2012). A numerical approach for the analysis of the coffee roasting process. Journal of Food Engineering 112, 243-252.

Botelho, F.M. (2012). Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora*. Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Viçosa; Minas Gerais, Brasil.

Hernández et al, J. A. (2007). Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting.

Journal of Food Engineering 78, 1141–1148.

Pabis, S., Jayas, D., Cenkowski, S. (1998). Grain Drying, Theory and Practice. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Schwartzberg, H. G. (2002). Modeling Bean Heating during Batch Roasting of Coffee Beans. In Engineering and Food for the 21st Century, 1036.

Vargas-Elías, G. A. (2011). Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação. Tesis de maestría. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: UFRV. 114p.

Vargas-Elías, G. A. (2014). Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação. Tesis de doctorado. UFV; Minas Gerais, Brasil. 68p.