

USO DE LA TÉCNICA DE ALAMBRE CALIENTE PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE INFUSIONES DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL^a

USING HOT WIRE TECHNIQUE FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF INFUSIONS OF ORGANIC AND CONVENTIONAL COFFEE

FERNANDO GORDILLO-DELGADO^b, DIEGO F. VALENCIA-GRISALES^b, JESÚS PLAZAS-SALDAÑA^b

Recibido 04-11-2016, aceptado 28-12-2016, versión final 30-12-2016.

Artículo Investigación

RESUMEN: Se implementó la técnica de alambre caliente (comúnmente llamada “hot-wire” por su traducción al inglés), un método versátil, de bajo costo y de alta precisión para la medición de la conductividad térmica de fluidos a través del aumento en la temperatura de un alambre que se introduce dentro del fluido y al que se le aplica entre sus extremos, de manera abrupta, una diferencia de potencial. El sistema se probó y calibró utilizando líquidos de conductividad bien conocida: agua, etilenglicol y glicerina. Este procedimiento se usó para medir la conductividad térmica de muestras de infusión de café orgánico y convencional. El mismo grado de tostión de los granos fue verificado con un colorímetro y la preparación se hizo por prensado de 22g del café en polvo en 110mL de agua. Los datos obtenidos se sometieron al Análisis de Varianza (ANOVA) y se confirmó que las diferencias de este parámetro termofísico en las dos muestras son significativas con un nivel de confianza de 95%. De esta forma, se comprobó que el valor de la conductividad térmica de la infusión de café permite diferenciar el café orgánico del convencional.

PALABRAS CLAVE: Conductividad térmica, alambre caliente, café orgánico, ANOVA.

ABSTRACT: The technique of hot wire, a versatile method of low cost and high accuracy for measuring the thermal conductivity of fluids through the increasing temperature of a wire that is immersed into the liquid and between its ends a potential difference is abruptly applied. Using well-known conductivity liquids: water, ethylene glycol and glycerine, the system was tested and calibrated. In this work, this procedure was used to measure the thermal conductivity of the infusion samples of organic and conventional coffee. The same roast degree of the beans was verified with a colorimeter and the preparation was made by pressing 22g

^aGordillo-Delgado, F., Valencia-Grisales, D. F. & Plazas-Saldaña, J. (2016). Uso de la Técnica de Alambre Caliente para la Medición de la Conductividad Térmica de Infusiones de Café Orgánico y Convencional. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 105–113. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.60889>

^bGrupo de Investigación en Ciencia Aplicada para el Desarrollo de la Ecorregión- GICADE del IIC. Universidad del Quindío. Carrera 15 Calle 12N, Armenia, Quindío, fgordillo@uniquindio.edu.co

of coffee powder in 110mL of water. The obtained data were subjected to Analysis of Variance (ANOVA) and this confirmed that the differences in the thermophysical parameter in the two samples are significant with a confidence level of 95 %. On this way, it was proved that the thermal conductivity value of the coffee infusion allows differentiate between organic and conventional coffee.

KEYWORDS: Thermal conductivity, hot-wire, organic coffee, ANOVA.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica del alambre caliente es utilizada para medir la conductividad térmica (k) de fluidos a través de la transferencia a la muestra del calor generado por una corriente eléctrica que pasa por un alambre en contacto con ella; normalmente el proceso se hace dentro de una celda cilíndrica. La variación de temperatura se registra por medio de las variaciones de tensión en el filamento. En el modelo para analizar los resultados obtenidos con esta técnica transitoria, se considera una fuente vertical lineal que tiene calor específico cero y conductividad térmica infinita, sumergida en un fluido isotrópico infinito con propiedades termofísicas independientes de la temperatura y que al inicio de la medición ($t = 0$) está en equilibrio termodinámico con la fuente (Azarfar, et al., 2016). La variación de la temperatura del alambre en función del tiempo, cuando por él circula una corriente constante es mostrada en la ecuación 1.

$$\Delta T(t) = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{\gamma^2} \right) - \gamma \right] \quad (1)$$

Donde q es el flujo de calor, γ es la constante de Euler, k es la conductividad térmica y α es la difusividad térmica de la muestra. La variación de la resistencia del alambre conductor que actúa como una fuente de calor debido al efecto Joule, permite determinar el cambio de temperatura teniendo en cuenta que:

$$R(t) = R_0(1 + \delta\Delta T) \quad (2)$$

En la ecuación 2 R_0 es la resistencia inicial del alambre y δ es el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica. Si la corriente, I , que se suministra al filamento es constante, pero la resistencia aumenta debido al calentamiento, la tensión también variará en función del tiempo:

$$\Delta V(t) = V(t) - V_0 = R_0 I \delta \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{\gamma^2} \right) - \gamma \right] \quad (3)$$

Donde $q = \frac{I^2 R_0}{L}$, con L la longitud del alambre. La derivada de la ecuación 3 con respecto al $\ln(t)$ es:

$$m = \frac{I^2 R_0^2 \delta}{4\pi k L} \quad (4)$$

A partir de esta igualdad se puede calcular la conductividad térmica (k) si se conoce la variación del voltaje en función del tiempo y la corriente suministrada al sistema (Marín, et al., 2014).

Los parámetros termofísicos intervienen directamente en el modelamiento de cualquier proceso térmico, ya que están involucrados con la transferencia de masa y de energía térmica y tienen una estrecha relación con la estructura y composición química de los materiales; por esta razón la técnica del alambre caliente es una herramienta particularmente importante en el estudio de alimentos líquidos, dado que no es destructiva, es de fácil manejo y es económica (Carson, et al., 2016).

En las últimas décadas algunos caficultores han implementado prácticas de cultivo orgánicas, sostenibles y amigables con el medio ambiente (Bravo-Monroy, et al., 2016), que dan un valor agregado al producto. El café orgánico es aquel que de acuerdo con los estándares de calidad nacional es fabricado y procesado sin el uso de insumos químicos de síntesis (plaguicidas y fertilizantes sintéticos). Todo caficultor que quiera comercializar su café bajo la designación de orgánico debe contratar a un organismo certificador que haga la inspección y control en su finca (Farfan & Sanchez, 2013). Este proceso es valioso en los negocios comerciales nacionales e internacionales (Nussbaum & Simula, 2013), así mismo es un elemento irremplazable para generar confianza en las relaciones cliente-proveedor (Grabs, et al., 2016). Aunque en ocasiones esta valoración subjetiva va acompañada por la inspección in situ a través de pruebas in vitro a los granos de café hechas en laboratorio, estos análisis son costosos y demorados. Por el contrario, con el uso de la técnica propuesta en este trabajo, se tiene un método cuantitativo para discriminar entre estos dos tipos de café, a través de una medición de alta precisión que no requiere de una preparación complicada de la muestra y que es de relativo bajo costo.

En este trabajo se reportan mediciones de la conductividad térmica de infusiones preparadas con café orgánico y convencional utilizando la técnica de alambre caliente; consecuentemente, se hizo un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) de este parámetro para determinar la existencia de diferencia significativa entre los dos tipos de muestra.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon cinco infusiones con café convencional y cinco con café orgánico y de cada una se tomaron 4 muestras para hallar la conductividad térmica. Los granos tostados con las que se prepararon fueron adquiridos en el comercio local.

2.1. Color del café

Se determinó la luminosidad, L , en una escala de 0 a 100, donde 0 es oscuro y 100 es blanco y la cromaticidad, a y b , en la que a indica rojo cuando es positivo o verde cuando es negativo y b indica amarillo cuando es positivo o azul cuando es negativo (Macías & Campo, 2002). Para hacer estas mediciones se utilizó un colorímetro convencional (iWave WF30).

2.2. Preparación de infusiones

El café en grano con el que se prepararon las infusiones tuvo un grado de tostión media; lo que se verificó utilizando el colorímetro. La molienda se hizo en un molino (Proctor-Silex) y se pasó el polvo a través de un tamiz para obtener un tamaño de partícula entre 300 y 350 micrómetros; seguidamente, se calentaron 110mL de agua a 99°C y se adicionaron 22g del café molido; finalmente, se agitó la mezcla y se dejó enfriar a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) para luego pasarlo por un filtro AeroPress.

2.3. Medición de la conductividad térmica

Se vertieron 85mL de la infusión en la celda de alambre caliente para la medición de la conductividad térmica. La medida de la tensión eléctrica se hizo con un multímetro digital de alto rendimiento (KEITHLEY 2000) y se utilizó un alambre de platino A-M SYSTEMSTM de 44AWG (78.7 μ m de diámetro). Se tomaron 120 datos en 10 segundos a través del computador mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Labview. Con este programa se hizo el control de un arreglo de relés, utilizados para activar la fuente de voltaje y el multímetro durante el tiempo de medición; para esto se empleó una conexión USB CDC entre un microcontrolador (PIC 18f4550) y el computador.

El montaje experimental se muestra en la figura 1. Una fuente DC de alimentación INSTEK (GPS-3303) se usó para suministrar a los extremos del alambre una diferencia de potencial cercana a 1 V. El alambre de platino se coloca en contacto con la solución contenida en una celda cilíndrica metálica de 17cm de alto y diámetro interno de 3.5cm. Con este sistema se determina la conductividad térmica del fluido a través del aumento en la temperatura del alambre con el tiempo, después de que se da un cambio de paso en el voltaje aplicado. Esta temperatura se puede estimar conociendo la resistencia eléctrica del alambre embebido en el fluido, empleando la ley de Ohm.

La curva obtenida de voltaje en función del logaritmo natural fue ajustada en una región de comportamiento lineal con la ecuación 4 para obtener la conductividad térmica de la infusión.

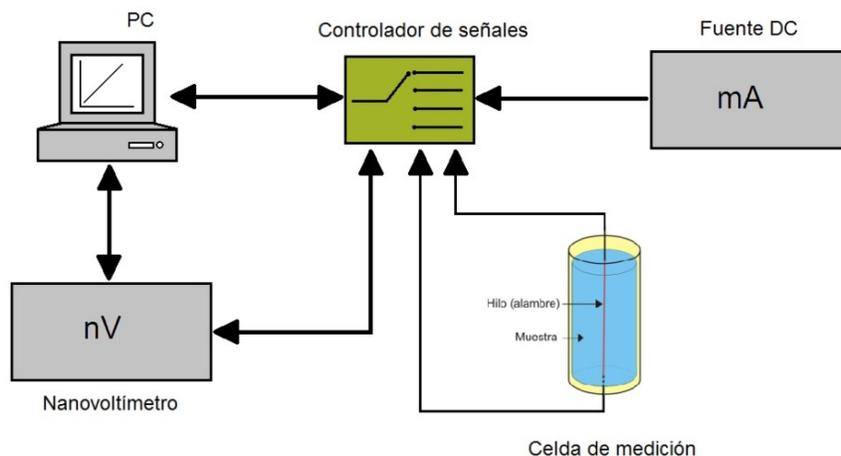


Figura 1: Montaje experimental de la técnica de alambre caliente. Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Color del café

En la tabla 1 se presentan los parámetros de color del café orgánico y convencional tostado, molido y tamizado. De esto se puede ver que los dos tipos de café están en el mismo rango de tosti3n, ya que presentan coloraci3n similar.

Tabla 1: Color de los diferentes tipos de caf3

Muestra en polvo	L	a	b
Caf3 org3nico	18.74±0.01	18.73±0.01	30.01±0.01
Caf3 convencional	18.90±0.01	18.87±0.01	37.63±0.01

3.2. Medici3n de la conductividad t3rmica en las infusiones de caf3

La calibraci3n del sistema de medici3n se hizo midiendo la conductividad t3rmica de agua, etilenglicol y glicerina; cuyos valores reportados: 0.57W/mK, 0,227W/mK y 0,28W/mK, respectivamente (Tye, 1969), son similares a los valores medidos: 0.60W/mK, 0,24W/mK y 0.29W/mK, respectivamente. Esto permiti3 establecer la confiabilidad en las mediciones.

En la figura 2(a) se muestra la nube de puntos experimentales correspondiente a la diferencia de potencial medido entre los extremos del alambre en funci3n del tiempo, cuando se puso en contacto con una muestra de infusi3n de caf3 org3nico dentro de la celda de medici3n. En la figura 2(b) se nota un comportamiento similar con la infusi3n preparada con caf3 convencional; en ambos casos se

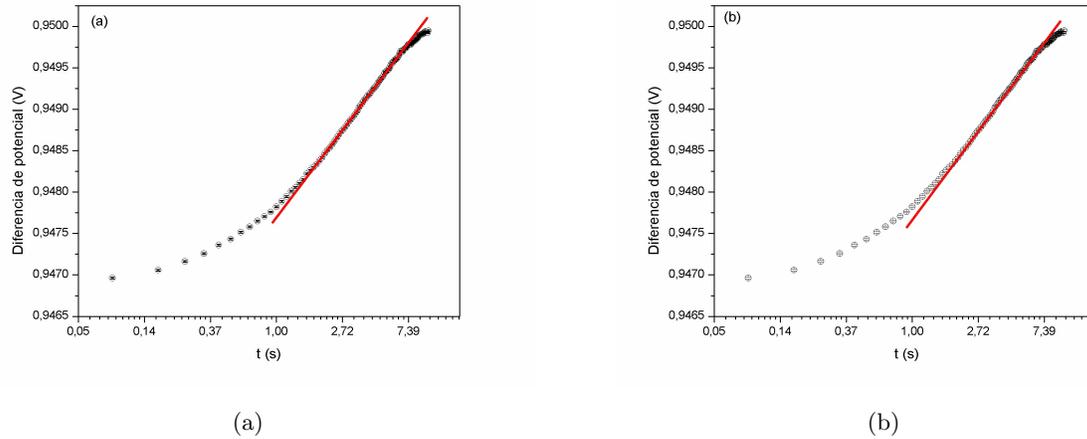


Figura 2: Datos tomados para: (a) una infusión de café orgánico y (b) una infusión de café convencional. La línea sólida corresponde al mejor ajuste lineal en la región de transición; en ambos casos con un valor de R^2 de 0.98.

Fuente: elaboración propia.

define el ajuste lineal en la región de transición; la pendiente de esta recta es un parámetro requerido en la ecuación 4 para obtener la conductividad térmica de la muestra. El comportamiento de las curvas fue similar en todos los casos.

3.3. Análisis de ANOVA de un solo factor

Se analizaron los valores de conductividad térmica de 20 infusiones preparadas con café orgánico y 20 con convencional. En la tabla 2 se pueden ver los valores promedio obtenidos con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación. El coeficiente de variación para los dos tipos de infusión es muy bajo, lo que indica buena precisión del instrumento y homogeneidad de los datos; por otro lado, el valor promedio de la conductividad térmica de las infusiones de café convencional y orgánico fue de 0.632 ± 0.004 W/mK y 0.607 ± 0.002 W/mK, respectivamente.

Tabla 2: Resultados del ANOVA de la conductividad térmica de las muestras.

Infusión de café	Recuento	Promedio (W/mK)	Desviación estándar (W/mK)	Coefficiente de variación
Convencional	20	0.632	0.004	0.58 %
Orgánico	20	0.607	0.002	0.37 %
Total	40	0.620	0.013	2.12 %

Con el fin de determinar el potencial de discriminación de este parámetro se planteó una hipótesis nula, H_0 :

$$H_0 : \mu_{Convencional} = \mu_{Organico} = \mu$$

Esta define que la media de la conductividad térmica de las infusiones de café, $\mu_{Convencional}$ y $\mu_{Organico}$ (convencional y orgánico), es igual; mientras que la hipótesis alterna, H_A , define que este valor es diferente en los dos casos:

$$H_A : \mu_{Convencional} \neq \mu_{Organico} \neq \mu$$

Tabla 3: ANOVA aplicado a la conductividad térmica de las infusiones de café.

Fuente	Suma de cuadrados (W/mK)	Grados de libertad	Cuadrado medio (W/mK)	Razón- F	Valor- P
Modo de cultivo	0.0064	1	0.0064	688.78	0.0000
Error	0.0004	38	0.000009		
Total	0.0068	39			

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos por ANOVA; se observa que la variación total de los 40 datos obtenidos en este experimento fue de 0,0068W/mK. De esta cantidad, 0,0064W/mK se debe a diferencias relacionadas con el modo de cultivo y 0,0004W/mK corresponde a la diferencia entre el modo de cultivo del mismo tipo. Al ponderar estos valores con los correspondientes grados de libertad, se obtuvieron los cuadrados medios que reflejan la magnitud real de cada fuente de variación. Así, se nota que la diferencia debida al modo de cultivo es de 0,0064W/mK y que el error es de 0,000009W/mK; por lo tanto, el cuadrado medio del modo de cultivo es aproximadamente 689 (tabla 3) veces más grande que el cuadrado medio del error; lo cual indica que las diferencias observadas entre los tipos de cultivo son significativas y que no se deben a pequeñas variaciones de las muestras. Como el valor P es menor del 5% se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no hay igualdad entre las medias del modo de cultivo. Para comprobar la presencia de diferencias significativas entre las medias de las conductividades térmicas de las muestras de ambos tipos de cultivo, se probaron las hipótesis utilizando el método de mínima diferencia significativa (LSD).

Tabla 4: Valores resultantes de la aplicación de la prueba LSD de acuerdo con modo de cultivo del grano utilizado.

Contraste	Sig.	Diferencia	±Límites
Café convencional - Café orgánico	* ^a	0.0253	0.00195153

^a * indica una diferencia significativa

En la tabla 4 se pueden observar los datos arrojados por la prueba LSD, de los que se determina que las medias son significativamente diferentes con un nivel del 95% de confianza.

4. CONCLUSIONES

El valor de la conductividad térmica de la infusión de café permite diferenciar el café orgánico del convencional, utilizando un análisis de varianza de un solo factor, en el que la variable respuesta está dada por el valor de este parámetro obtenido mediante la técnica de alambre caliente. Los datos de esta magnitud oscilaron entre 0.632 y 0.633 W/mK y entre 0.606 y 0.608 W/mK, para las muestras de café convencional y orgánico, respectivamente. Por otro lado, se obtuvo información de la precisión de las mediciones, que tuvieron un coeficiente de variación menor del 1 %.

Posiblemente la conductividad térmica de la infusión preparada con café convencional es mayor debido al contenido de lípidos, proteínas y ácidos como lo expresa Macías & Campo (2002).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Quindío por la financiación de este trabajo y por el apoyo a través del programa de estímulo económico a grupos de investigación.

Referencias

- Azarfar, S., Movahedirad, S., Sarbanha, A., Norouzbeigi, R. & Beigzadeh, B. (2016). Research Paper: Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids. *Applied Thermal Engineering*, 105, 142–150.
- Bravo-Monroy, L., Potts, S. & Tzanopoulos, J. (2016). Drivers influencing farmer decisions for adopting organic or conventional coffee management practices. *Food Policy*, 58, 49–61.
- Carson, J., Wang, J., North, M & Cleland, D. (2016). Effective thermal conductivity prediction of foods using composition and temperature data. *Journal of Food Engineering*, 175, 65–73.
- Farfan, F. & Sanchez, P. (2013). Certificación de fincas de producción de café orgánico, *Avances técnicos Cenicafé*, 363, 120–178. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wpcontent/uploads/2016/04/avt0363.pdf>.
- Grabs, J., Kilian, B., Hernández, D. C. & Dietz, T. (2016). Understanding Coffee Certification Dynamics: A Spatial Analysis of Voluntary Sustainability Standard Proliferation. *International Food & Agribusiness Management Review*, 19, 31–55.
- Macías, A., Campo, E. (2002). Café orgánico: caracterización, torrefacción y enfriamiento. *Cenicafé*, 53, 281–292. Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc053\(04\)281-292.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc053(04)281-292.pdf).

Marín, E., Bedoya, A., Alvarado, S., Calderón, A., Ivanov, R. & Gordillo-Delgado, F. (2014). An explanation for anomalous thermal conductivity behaviour in nanofluids as measured using the hot-wire technique. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47, 1–8.

Nussbaum, R. & Simula, M. (2013). *The forest certification handbook*. Taylor & Francis: 563–583.

Tye, R. P. (1969). *Thermal conductivity*, vol 1. Academic Press.