

estudio de las **propiedades térmicas** de compósitos geológicos del **Popocatépetl**

Elías López Cruz
Víctor Dossetti Romero



INTRODUCCIÓN

Recientes emisiones volcánicas del Popocatépetl han cubierto la ciudad de Puebla y poblaciones aledañas con ceniza volcánica. Desde las primeras emisiones importantes en esta década, en diciembre de 1994, nos hemos dedicado a recoger muestras de esta ceniza habiendo reunido, a la fecha, un total de ocho muestras de diferentes épocas.

Tratando de realizar un estudio con el objetivo de conocer sus propiedades térmicas tales como difusividad térmica, conductividad térmica y capacidad calorífica, se observó que aplicando la técnica de espectroscopia fotoacústica¹ de celda abierta (EFCA), conjuntamente con la de velocidad de enfriamiento por radiación¹, podríamos obtener los valores de las propiedades térmicas antes mencionadas.

El objetivo fundamental en este trabajo es obtener una idea de cómo se comportan los componentes sólidos en el interior del volcán. Dado que la emisión de materiales sólidos desde el cráter está forzada por el calor del interior del mismo, es obvio que las propiedades térmicas de los materiales expulsados juegan un papel importante en estos procesos.

Nos proponemos hacer un modelo de cómo está evolucionando el complejo interior del Popocatépetl. Este último objetivo será alcanzado en la medida que tengamos acceso a ceniza y muestras rocosas expelidas por el volcán durante su periodo de actividad.

PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para realizar el análisis de las muestras, preparamos compósitos^{2,3} usando como matriz un adhesivo comercial (pegamento blanco). Se hace una masa lo más homogénea posible de ceniza con pegamento cuidando que las proporciones en volumen sean 3:2 aproximadamente para todas las mezclas. Luego se deposita la masa de forma esférica entre dos portaobjetos y se presiona hasta obtener una oblea con un espesor aproximado a las 350 micras, procurando que en la maniobra no se formen huecos.

Después de obtener la oblea, se corta una sección en forma octagonal con un diámetro entre 4 y 7 mm. El requerimiento de opacidad óptica (implícito en el análisis teórico) se obtiene pintando una de las caras de la muestra con tinta china negra procurando que se deposite una película muy delgada de tinta.

MEDICIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA

La sección transversal del detector^{1,4} fotoacústico de celda abierta (Figura 1) presenta el montaje de la muestra que absorbe la radiación sobre un micrófono de electreto. Claramente, este detector fotoacústico no requiere un medio transductor adicional (i.e., la capa de aire confinada que se encuentra en cualquier celda fotoacústica convencional), ya que el micrófono actúa simultáneamente como celda y detector.

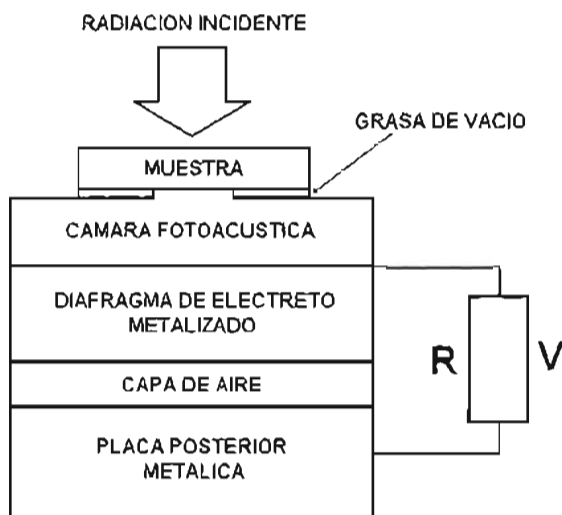


Figura 1. Sección transversal de la celda abierta para espectroscopia fotoacústica utilizando la cámara de aire frontal de un micrófono de electreto común como transductor.

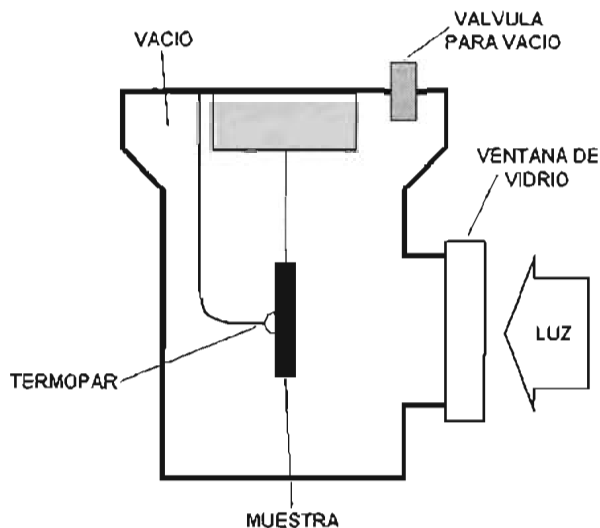


Figura 2. Arreglo experimental usado para la medición de la conductividad térmica

El típico diseño de un micrófono de electreto consiste en un diafragma de electreto metalizado (teflón de $12\ \mu\text{m}$ con un electrodo metálico depositado de 500-1,000 angstroms de espesor) y una placa metálica separada del diafragma por una capa de aire ($45\ \mu\text{m}$).

La película de metal y la placa se encuentran conectadas a través de una resistencia R . La entrada de aire frontal es un orificio circular de 3 mm de diámetro; la cámara frontal de aire adyacente a la película metalizada del diafragma es cercana a 1 mm de largo.

La muestra es iluminada con luz blanca que es enfocada con un arreglo de lentes convencional; el haz luminoso es modulado por medio de un recortador de haz tipo estroboscópico. Con este procedimiento se consigue efectuar un calentamiento periódico de la muestra, toda vez que la luz se absorbe en la tinta negra que cubre la muestra; de esta manera, la luz se convierte en calor que se propaga hacia la muestra. Ésta, a su vez, transmite el calentamiento hacia el interior de la celda fotoacústica.

Como resultado del calentamiento periódico de la muestra por la absorción de luz modulada, la presión en la cámara frontal oscila a la frecuencia de modulación causando que el diafragma se flexione, lo cual genera un voltaje V a través de la resistencia R . Este voltaje es subsecuentemente alimentado en un preamplificador FET que se encuentra dentro de la cápsula del micrófono. El voltaje de polarización de nuestro FET es de 9.0 V.

Como la Figura 1 ilustra, la muestra sirvió como tapa de la celda abierta y la iluminación de la muestra se realizó con una lámpara de tungsteno de 250 W. La señal del micrófono se conectó a un amplificador sensible a fase (*lock-in*) usado para registrar tanto la amplitud de la señal como su fase.

MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica fue medida con la técnica de velocidad de enfriamiento por radiación¹ en combinación con los resultados de la difusividad térmica de la EFCA. El arreglo experimental en este caso (Figura 2) utiliza las mismas muestras usadas para la medición anterior, sólo que ahora se pintó también la parte posterior de la muestra. Así se asegura una superficie de absorción óptica y el mismo coeficiente de transferencia de calor para ambas superficies. La muestra fue suspendida adiabáticamente en un criostato al cual se le practicó vacío posteriormente. Bajo estas condiciones el principal mecanismo de pérdida de calor es la radiación. El criostato tenía una ventana a través de la cual luz blanca continua era enfocada hacia una de las caras de la muestra. Un termopar fue acoplado a la otra cara de la muestra utilizando grasa de silicón. De esta manera la variación de temperatura fue monitoreada en función del tiempo. Utilizando la aproximación de radiación de cuerpo negro, encontramos el tiempo característico de termalización τ . Para esto, se iluminó la

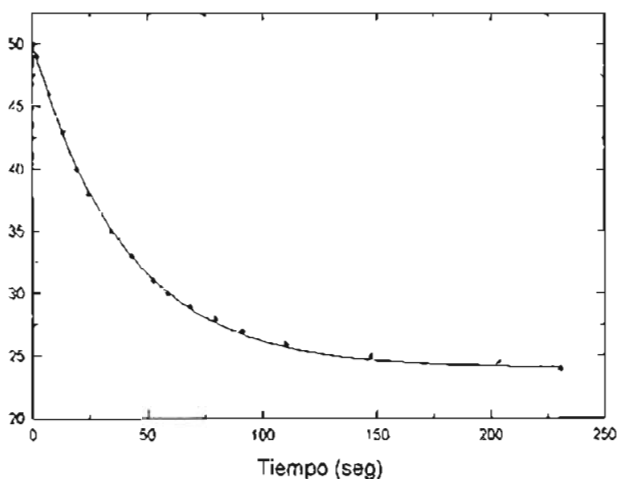


Figura 3. Gráfica típica de velocidad de enfriamiento por radiación. En este caso se muestra la gráfica de los datos experimentales de la muestra del 17 de marzo de 1995 y su ajuste (línea continua) con la ecuación siguiente: $T(t) = T_r + \Delta T_m e^{-t/\tau}$, donde $T_r = 24^\circ\text{C}$, $\Delta T_m = 26^\circ\text{C}$ y $\tau = 40.63$ seg

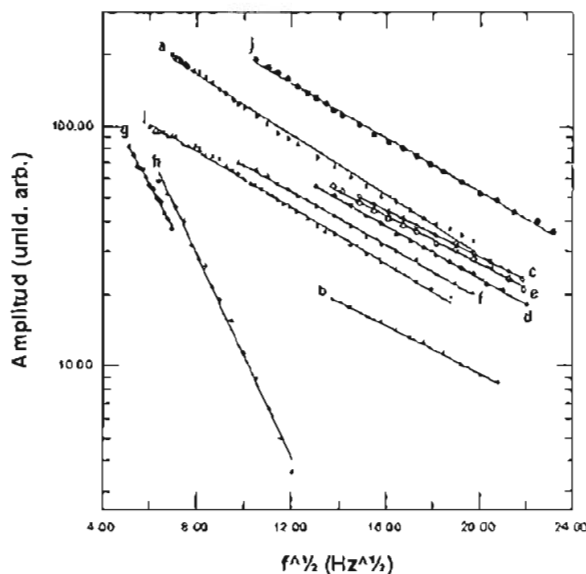


Figura 4. Gráfica de los datos experimentales de la señal fotoacústica para todas las muestras de ceniza y sus ajustes con la ecuación (5).

muestra llevándola a una temperatura que se encuentra por encima de la ambiente (en este caso 50°C) y después se interrumpió la iluminación. Como resultado sólo se tiene pérdida de energía por radiación:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -L \quad (1)$$

donde

$$L = A \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

es la potencia perdida por radiación, A es el área de la muestra, ε es la emisividad de cuerpo negro y tiene un valor igual a 1; $T_0 = 300^\circ\text{K}$ es la temperatura ambiente y $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann. La solución para el cambio de temperatura es

$$\Delta T(t) = \Delta T_m e^{-t/\tau} \quad (3)$$

con ΔT como la variación máxima en la subida de temperatura y τ está dada por¹

$$\tau = l_r \rho c / 8 \varepsilon \sigma T_0^3 \quad (4)$$

donde l_r es el espesor y ρ la densidad de la muestra.

Fecha	Letra	Espesor μm	Difusividad térmica α (m^2/s)	Conductividad térmica k ($\text{Ws}/\text{m}^2\text{K}$)	Capacidad calorífica c (Ws/KgK)
23-12-94	a	350	1.84×10^6	17.90	361.20
17-03-95	b	900	1.88×10^4	107.60	299.01
10-03-96	c	600	9.30×10^{-5}	68.45	302.00
13-03-96	d	350	2.47×10^{-5}	23.31	321.60
16-03-96	e	600	8.62×10^{-5}	60.12	326.67
30-04-96	f	350	2.38×10^{-5}	22.00	349.76
12-05-97 (sur)	g	650	7.64×10^{-5}	4.67	245.15
12-05-97 (norte)	h	600	4.74×10^{-5}	3.47	328.92
27-05-97	i	500	4.36×10^{-5}	35.51	322.91

Tabla 1. Espesores y propiedades térmicas de las diferentes muestras de ceniza.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

El descenso de la temperatura en la superficie posterior de la muestra (Figura 3) después de interrumpir la iluminación, permite el ajuste de los datos experimentales mediante una función exponencial con τ como parámetro de ajuste. Una vez que se obtiene el valor de τ podemos calcular el valor experimental de la capacidad térmica por unidad de volumen ρc de la ecuación (4).

El rango de frecuencia de modulación (25 a 400 Hz) para la adquisición de datos con la técnica de EFCA y el espesor típico de las muestras de 500 μm nos permite asegurar que las muestras son térmicamente gruesas y, por lo tanto, la señal fotoacústica decrece de forma exponencial con la frecuencia moduladora de acuerdo con $(1/f) \exp(-a f^{1/2})$, donde a es igual a $(\pi l_s^2 / \alpha_s)^{1/2}$. La difusividad térmica α_s puede ser obtenida de los datos experimentales de amplitud de la señal, como función de la frecuencia moduladora f ajustándolos con la expresión

$$S = (A / f) e^{(-a \sqrt{f})} \quad (5)$$

La constante A , en la señal medida S , aparte de factores geométricos, contiene otros factores como propiedades térmicas del gas. Entonces tenemos dos parámetros variables para el ajuste: A y a para describir el monitoreo fotoacústico de la difusividad térmica de la muestra. Una vez conocido el coeficiente a de los valores de ajuste, α_s se puede obtener fácilmente de la expresión $\alpha_s = \pi l_s^2 / a^2$. Se pueden observar

los ajustes realizados sobre los datos experimentales obtenidos con la técnica de EFCA (Figura 4).

El cálculo de la capacidad calorífica c se puede efectuar si conocemos la densidad de las muestras para lo cual simplemente se deben pesar y calcular su volumen con lo que el valor de la densidad está dado por $\rho = m / V$.

Una vez obtenidos los valores de capacidad calorífica y difusividad térmica podemos calcular la conductividad térmica de la ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (6)$$

donde k es la conductividad térmica.

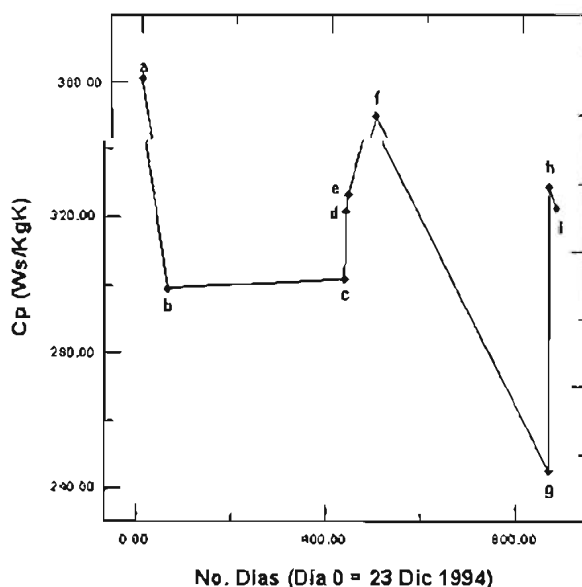


Figura 5. Gráfica de capacidades caloríficas de las muestras de ceniza volcánica y su evolución cronológica.

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos de difusividad térmica, capacidad calorífica y conductividad térmica para las ocho muestras de ceniza recogidas entre el 23 de diciembre de 1994 y el 27 de mayo de 1997. Finalmente, se presenta la evolución cronológica de la capacidad calorífica de las muestras de compósitos volcánicos (Figura 5).

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta resultados preliminares del análisis de las propiedades térmicas de cenizas del Popocatepetl. Incluso no contando con ceniza de todas las épocas en que hubo emanaciones, el hecho de que se obtengan valores diferentes de la conductividad térmica y de la capacidad calorífica significa que el calor generado en el interior del cráter sigue caminos diferentes para escapar. Este patrón de cambios lo notamos mediante la ceniza con diferentes propiedades térmicas que nos ha estado llegando en las fechas recientes de actividad volcánica. Por otro lado, es notorio el gran valor de la técnica de espectroscopia fotoacústica para obtener valores de las propiedades térmicas de la ceniza volcánica.

GLOSARIO

Adiabático. Sin pérdida o ganancia de calor por parte del sistema involucrado.

Criostato. Regulador para mantener temperatura baja constante.

Difusividad térmica. La magnitud de esta cantidad (definida por la ecuación 6) determina la razón a la que un cuerpo con una temperatura no uniforme tiende al equilibrio térmico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo expresan su agradecimiento a Jimmy Hernández, Juan Carlos Apam y Edgar Corona, quienes colaboraron en las etapas preliminares del presente trabajo. Agradecemos también a José Antonio Méndez por su ayuda en la etapa final.

REFERENCIAS

- ¹ Alvarado, J.J., Zelaya, O., Sánchez, F., Yañez, M., Vargas, H., Figueroa, J.D.C., Martínez, F., Martínez, J.L. and González, J., "Photoacoustic monitoring of processing conditions in cooked tortillas: measurement of thermal diffusivity", *Journal of Food Science*, 60:2, 1995, pp. 1-5.
- ² López Cruz, E., "Un enfoque fractal elemental para compósitos", *INFOCERAM*, Año 5, No. 3, 1994, pp. 5-8.
- ³ Monette, L., Anderson, M.P. and Grest, G.S., "Effect of volume fraction and morphology of reinforcing phases in composites", *J. Appl. Phys.*, 75, 1994, pp. 1155-70.
- ⁴ Marquzini, M.V., Cella, N., Manzanares, A.M., Vargas, H. and Miranda, L.C.M., "Open photoacoustic cell spectroscopy", *Meas. Sci. Technol.*, 2, 1991, pp.360-401.

(Elias López Cruz es investigador del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de Puebla; Víctor Dossetti Romero es estudiante de la Maestría en Ciencias del Instituto de Física de la UAP. Este trabajo fue parcialmente apoyado por CONACYT.)

