

## EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE AGUA EN LAS PROPIEDADES TERMO-FÍSICAS DE POLVOS DE CARBÓN

J. H. Bautista-Ruiz <sup>(1)</sup>, G. Peña-Rodríguez <sup>(1)</sup> y W. Aperador-Chaparro <sup>(2)</sup>

(1) Departamento de Física, Grupo de investigación en Tecnología Cerámica (GITEC) Universidad Francisco de Paula Santander, COLOMBIA.

(2) Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, COLOMBIA.

E-mail: [jorgebautista@ufps.edu.co](mailto:jorgebautista@ufps.edu.co)

### RESUMEN

Se reporta por primera vez las propiedades termofísicas (*calor específico por unidad de volumen* ( $\rho c$ ), *conductividad* ( $k$ ), *efusividad* ( $\epsilon$ ) y *difusividad térmica* ( $\alpha$ )) a temperatura ambiente de polvos de carbón térmico, en función de la concentración de agua agregada a los mismos, la cual varió en porcentaje en peso (%wt) entre el 5 y 50%. Las muestras fueron obtenidas de la mina Cerro Tasajero ubicada en el área metropolitana de San José Cúcuta, Colombia, las cuales se pulverizaron manualmente utilizando molino de rodillos y se tamizaron en malla pasante número 50 (300  $\mu$ m). Las propiedades termofísicas se determinaron, usando el principio físico de flujo lineal transitorio de calor, mediante el sistema KD2<sup>®</sup> Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc). El porcentaje de ceniza presente en la muestra, se determinó mediante la norma ASTM D 3174, encontrándose un valor del 1,75%; para hallar la concentración de azufre se utilizó la norma ASTM 3177, reportando un valor de 0,45%, mientras que el porcentaje de materia volátil presente en la muestra fue del 34,17%, el cual se halló aplicando la norma ASTM 3175. El análisis de  $k$  y  $\rho c$ , en función de la concentración de agua, se realizó usando el ajuste a los datos experimentales a través de la función logística  $y = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 - (x/x_0)^n]} + A_2$  donde  $A_1$  corresponden a los valores de la propiedad

térmica ( $y$ ) para la concentración inicial de agua ( $x$ );  $A_2$  representa dicho valor para cuando la concentración de agua ( $x$ ) es muy grande;  $x_0$  corresponde al punto donde sucede el cambio de curvatura y  $n$  la razón de crecimiento o decrecimiento. Los resultados encontrados en este trabajo, serán utilizados en el desarrollo de estudios que permitan la fabricación de cilindros de polvos de carbón prensados a altas presiones, los cuales se usarán en los procesos de combustión en hornos industriales utilizados en la sinterización de productos cerámicos como teja, bloque y baldosa.

### Tópico 4: Materiales cerámicos

**Palabras clave:** Polvos de carbón térmico, propiedades termo-físicas, concentración de agua.

### 1. INTRODUCCIÓN

El carbón es el combustible fósil más abundante, no solamente existen grandes reservas, sino que éstas se encuentran ampliamente repartidas a nivel global. Actualmente el carbón es la mayor fuente de energía primaria utilizada por las termoeléctricas, la industria siderúrgica, así como fuente de combustión en los procesos de quema o cocción de productos cerámicos tradicionales como ladrillos, tejas y baldosas [1-3].

El bajo costo y la disponibilidad del carbón, permitirá por muchos años más su uso como combustible, o fuente de energía especialmente en los países en vía de desarrollo.

Los problemas medioambientales derivados del uso de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías encaminadas a mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes a los cada vez más restrictivos niveles adoptados en los protocolos internacionales [4]. El carbón tiene muchos usos importantes, aunque los más significativos son la producción de electricidad, la fabricación de acero, cemento y otros procesos industriales de producción de calor [5-6].

En los últimos años Colombia ha aumentado su participación en las exportaciones de carbón térmico y carbón coquizable, con una buena contribución de la zona de Norte de Santander [7-8]. Se hace indispensable desarrollar estudios que contribuyan a mejorar las condiciones para la explotación y utilización del carbón, de manera que sea posible disminuir pérdidas y lograr el máximo rendimiento en su utilización, cumpliendo con las normas medioambientales.

Los resultados encontrados en el desarrollo de esta investigación, serán utilizados con el objetivo de fabricar cilindros de carbón compactados a altas presiones, los cuales se usaran en los procesos de combustión de hornos en la industria de producción cerámicas que son relevantes en el área metropolitana de San José de Cúcuta y su área fronteriza con la República Bolivariana de Venezuela.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### Preparación de las muestras

Se tomaron muestras representativas de carbón mineral de la mina Cerro Tasajero ubicada en el área metropolitana de San José de Cúcuta. Las muestras se pulverizaron manualmente mediante molino de rodillos. Los polvos obtenidos se tamizaron en malla pasante números 50 (300  $\mu\text{m}$ ). Utilizando el secadero de circulación forzada marca Gabrielli<sup>®</sup>, a una temperatura de  $312 \pm 0,5$  K por un tiempo de 24 horas se realizó el proceso de secado, a la masa inicial de la muestra, se le agregó agua destilada en porcentaje en peso con variaciones cada 5% en un rango comprendido entre el 5% hasta el 50%, luego se compactaron con una presión constante de  $(1,724 \pm 0,231)$  MPa. Posteriormente se procede a medir la conductividad térmica ( $k$ ) y el calor específico por unidad de volumen ( $\rho c$ ), para cada variación de la concentración de agua mediante el sistema KD2<sup>®</sup> Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc). Se tomaron cinco lecturas de  $k$  y  $\rho c$ , con una diferencia entre medidas de cinco minutos y luego se promediaron. La efusividad ( $\varepsilon$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ), se calculó a partir de los valores promedios de  $k$  y  $\rho c$ , usando las expresiones  $\varepsilon = \sqrt{k\rho c}$  y  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  respectivamente. La densidad ( $\rho$ ) se determinó como la razón masa volumen

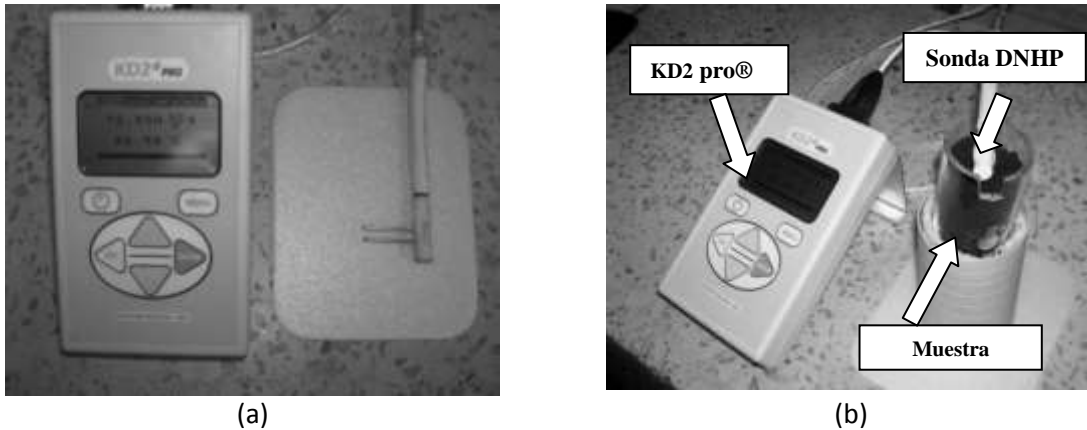
para las muestras compactadas. Para complementar la caracterización de las muestras de carbón de la mina Cerro Tasajero, el porcentaje de ceniza se halló usando la norma ASTM D 3174; la concentración de azufre se halló empleando la norma ASTM 3177, mientras que la materia volátil se determinó aplicando la norma ASTM 3175, y mediante la norma ASTM D 3174 se estableció el porcentaje de ceniza.

### Método experimental

El sistema KD2-Pro<sup>®</sup>, permite hallar las propiedades térmicas, usando como principio físico el flujo lineal transitorio de calor, en el cual se monitorea el perfil de temperatura en función del tiempo, determinándose los parámetros termofísicos  $k$  y  $\rho c$ . El sistema realiza mediciones experimentales, que se ajustan a funciones exponenciales integrales mediante un procedimiento no lineal de mínimos cuadrados. Un término de la tendencia lineal corrige los cambios de temperatura de la muestra durante la medida, optimizando así la exactitud de las lecturas [9]

La figura 1(a), muestra el sistema KD2-Pro<sup>®</sup> junto con la sonda de doble aguja empleada en el desarrollo del presente trabajo. En la figura 1(b), se presenta el proceso experimental empleado para efectuar las mediciones de las propiedades térmicas de los polvos de carbón compactados con

diferentes porcentajes en peso de agua. Se visualiza la ubicación de la sonda o sensor sobre la muestra de carbón y su conexión al analizador KD2-Pro®.



**Figura 1.** Sistema KD2-Pro®. (a) con el sensor o sonda de doble aguja. (b) montaje experimental

Con el sistema KD2 pro® se halló los valores de  $k$  y  $\rho c$  mediante el monitoreo de la disipación del calor proveniente de una fuente lineal transitoria de calor dada por un voltaje conocido. La ecuación (1) muestra el modelo matemático para la conducción de calor radial en un medio homogéneo e isótropo.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Donde  $T$  temperatura (K),  $t$  tiempo (s),  $\alpha$  difusividad térmica ( $m^2 s^{-1}$ ) y  $r$  es la distancia (m). Una solución a la expresión (1), es dada por la ecuación (2), donde  $T_o$  es la temperatura inicial,  $q$  es el calor producido por unidad de longitud y de tiempo ( $Wm^{-1}$ ),  $k$  es la conductividad térmica del medio ( $W m^{-1}K^{-1}$ ), y  $E_i$  es la función integral exponencial dada por ecuación (3)

$$\frac{-r^2}{4(t)} \quad (2)$$

$$-E_i(-a) = \int_1^{\infty} \frac{1}{u} \exp(-u) du = -\gamma - \ln(r^2/4t) + r^2/4t - (r^2/8t)^2 + \dots \quad (3)$$

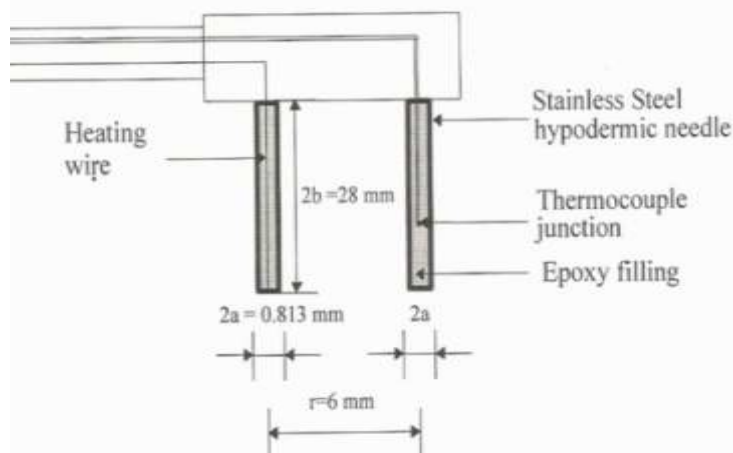
Con  $a=r^2/4\alpha t$  y  $\gamma$  es la constante de Euler (0,5772...).

Cuando  $t$  es grande, los términos de orden superior pueden ignorarse. Combinando las ecuaciones (2) y (3) se obtiene la ecuación (4), donde se utilizó que  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  [10]:

$$T - T_o \cong \frac{q}{4\pi k} \left( \ln(t) - \gamma - \ln\left(\frac{\rho c r^2}{4kt}\right) \right) \quad (4)$$

De la expresión anterior, es evidente que  $\Delta T (T - T_o)$  y  $\ln(t)$  están linealmente relacionados con una pendiente  $m = q/4\pi k$ , la cual permite hallar el parámetro  $k$ ,  $\rho c$  se determina del factor  $\ln\left(\frac{\rho c r^2}{4kt}\right)$ .

**El sensor Dual-Needle Heat-Pulse (DNHP)** consiste de dos agujas de acero inoxidable 304, dispuestas en forma paralela y separadas 6 mm (Figura 2 [11]). Una de las agujas es la fuente de calor y la otra es el sensor de temperatura. Un material epoxy de alta conductividad térmica llena los espacios entre la fuente lineal de calor o la termocupla y su funda. Un pulso de calor de corta duración es aplicado para calentar y monitorear el perfil de temperatura en función del tiempo.



**Figura 2.** Representación esquemática del sensor Dual-Needle Heat-Pulse (DNHP) [11]

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

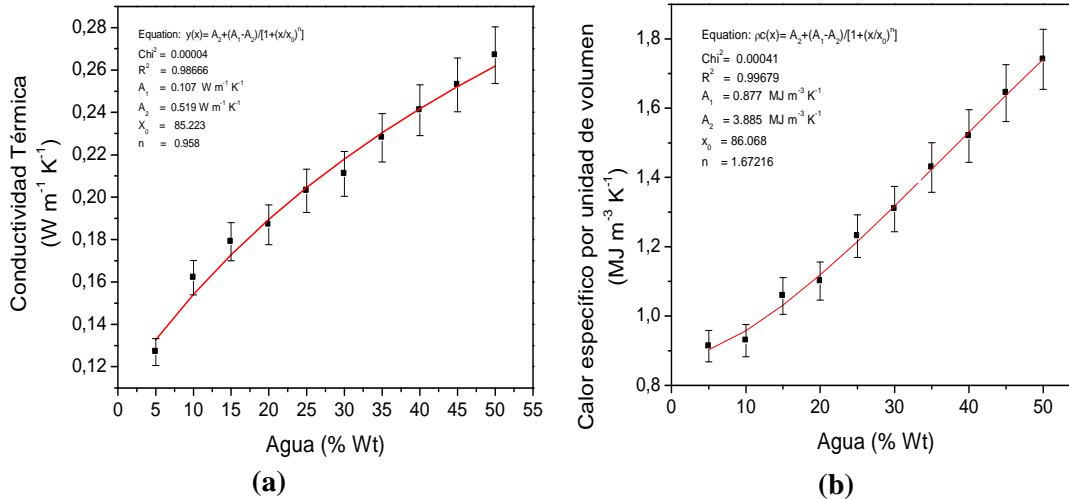
En la tabla 1, se reportan los datos de las propiedades térmicas halladas experimentalmente ( $k$  y  $\rho c$ ) y las calculadas ( $\varepsilon$  y  $\alpha$ ), para una temperatura promedio de  $229 \pm 0,3$  K.

**Tabla 1.** Propiedades termofísicas de las muestras en función del porcentaje en peso (%Wt) de agua agregada, para una temperatura promedio de  $229 \pm 0,3$  K

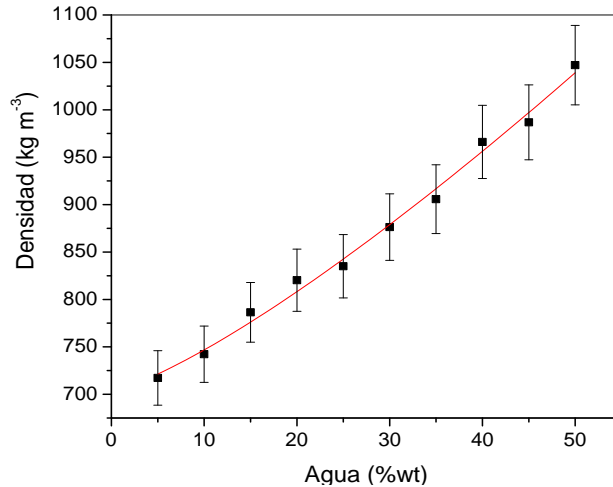
Humedad (%)	$k$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$\rho c$ ( $10^6(\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1})$ )	$\varepsilon$ ( $10^3(\text{Ws}^{1/2}\text{m}^2\text{K}^{-1})$ )	$\alpha$ ( $10^{-6}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ )
5	$0,127 \pm 0,006$	$0,913 \pm 0,045$	$0,341 \pm 0,017$	$0,179 \pm 0,003$
10	$0,162 \pm 0,008$	$0,929 \pm 0,046$	$0,388 \pm 0,019$	$0,174 \pm 0,003$
15	$0,179 \pm 0,009$	$1,058 \pm 0,052$	$0,435 \pm 0,022$	$0,169 \pm 0,003$
20	$0,187 \pm 0,009$	$1,101 \pm 0,055$	$0,454 \pm 0,023$	$0,170 \pm 0,003$
25	$0,203 \pm 0,010$	$1,231 \pm 0,061$	$0,500 \pm 0,025$	$0,165 \pm 0,003$
30	$0,203 \pm 0,010$	$1,309 \pm 0,065$	$0,526 \pm 0,023$	$0,161 \pm 0,003$
35	$0,228 \pm 0,011$	$1,429 \pm 0,071$	$0,571 \pm 0,028$	$0,160 \pm 0,003$
40	$0,241 \pm 0,012$	$1,520 \pm 0,076$	$0,605 \pm 0,030$	$0,159 \pm 0,003$
45	$0,253 \pm 0,012$	$1,644 \pm 0,082$	$0,645 \pm 0,032$	$0,154 \pm 0,003$
50	$0,267 \pm 0,013$	$1,741 \pm 0,087$	$0,682 \pm 0,034$	$0,153 \pm 0,003$

El comportamiento de  $k$  y  $\rho c$  en función de la concentración de agua (% wt), se presenta en la figura 3 (a) y 3 (b) respectivamente, de éstas se aprecia que tanto  $k$  como  $\rho c$  aumentan al incrementarse la concentración de agua presente en la muestra. Por otra parte se encontró que el valor de  $k$  cuando tiene una concentración de agua del 50% Wt es el 110 % mayor que cuando tiene 5% Wt de agua agregada, de igual forma se aprecia que la capacidad de almacenar o ceder energía ( $\rho c$ ) se incrementa en un 90,7% entre la condición inicial (5%Wt) y final (50%Wt). El análisis de  $\varepsilon$ , permite inferir que a medida que se agrega agua a la muestra, la capacidad de intercambiar calor con su entorno se incrementa hasta en un 100 %, mientras que la rapidez por unidad de longitud ( $\alpha$ ), con la que el calor se mueve dentro de la muestra disminuye hasta un 14,5% a medida que la

concentración de agua se aumenta, para el rango estudiado (5% Wt- 50%Wt). El análisis anterior es coherente pues se encontró que la densidad de la muestra aumenta al aumentar la concentración de agua, tal como se aprecia en la figura 4.



**Figura 3.** (a) Conductividad térmica, (b) Calor específico por unidad de volumen en función de la concentración de agua agregada a la muestra.



**Figura 4.** Densidad en función de la concentración de agua (%Wt) agregada a la muestra.

En la figura 3(a) y 3(b), la línea sólida corresponde al mejor ajuste a los datos experimentales de los parámetros termofísicos ( $k$  y  $\rho c$ ) en función de la concentración (%wt) de agua agregada a la muestra, dicho ajuste correspondió a una función logística de crecimiento con límite de saturación dada por la expresión (5) [12]. Dicho ajuste se realizó usando el software Origin Pro Ver. 7.0

$$y = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 - (x/x_0)^n]} + A_2 \quad (5)$$

Donde  $A_1$  corresponde al valor de la propiedad térmica ( $y$ ) de la muestra cuando no se agrega agua ( $x=0\ %wt$ );  $A_2$  corresponderá al valor de la propiedad térmica cuando la concentración de agua es

muy grande ( $x \gg$ ), es decir el valor máximo de saturación;  $x_0$  corresponde al punto donde se produce el cambio de curvatura y  $n$  es la razón de crecimiento. De lo anterior se encontró, que el valor de  $k$  y  $\rho c$  para cuando no se agrega agua a la muestra es de  $0,107 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  y  $3,890 \text{ MJ m}^{-3} \text{ k}^{-1}$ , de igual forma los valores para estos parámetros termofísicos cuando hay saturación de agua reportó un valor de  $0,519 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para  $k$  y  $3,885 \text{ MJ m}^{-3} \text{ k}^{-1}$  para  $\rho c$ .

Para complementar el estudio, los polvos de carbón de la Mina Cerro Tasajero se caracterizaron químicamente. De tal forma que el porcentaje de ceniza presente en la muestra, se determinó mediante la norma ASTM D 3174; la concentración de azufre se establece con la norma ASTM 3177, reportando un valor de 0,45%, mientras que la materia volátil se precisa aplicando la norma ASTM 3175. Esta información se encuentra registrada en la tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de los análisis químicos de las muestras de carbón térmico.

Análisis	%
Ceniza	1,75±0,03
Material volátil	34,17±0,05
Azufre	0,45±0,02

#### 4. CONCLUSIONES.

Se reporta por primera vez, los resultados del estudio sobre el efecto de la concentración de agua y en las propiedades termofísicas como la conductividad, el calor específico por unidad de volumen, la emisividad y difusividad, y la densidad de polvos de carbón térmico de la mina Cerro Tasajero ubicada en Cúcuta-Colombia.

Se encontró que el valor de  $k$  cuando tiene una concentración de agua del 50% Wt es el 110 % mayor que cuando tiene 5% Wt de agua agregada, de igual forma se aprecia que la capacidad de almacenar o ceder energía ( $\rho c$ ) se incrementa en un 90,7% entre la condición inicial (5% Wt) y final (50% Wt). El análisis de  $\epsilon$ , permite inferir que a medida que se agrega agua a la muestra, la capacidad de intercambiar calor con su entorno se incrementa hasta en un 100 %, mientras que la rapidez por unidad de longitud ( $\alpha$ ), con la que el calor se mueve dentro de la muestra disminuye hasta un 14,5% a medida que la concentración de agua se aumenta, para el rango estudiado (5% Wt-50% Wt)

El porcentaje de ceniza, presente en la muestra, se determinó mediante la norma ASTM D 3174 encontrándose un valor de 1,75% el cual se determinó mediante la norma ASTM D 3174; la concentración de azufre se halló usando la norma ASTM 3177, reportando un valor de 0,45%, mientras que para la materia volátil se encontró un valor de 34,17% aplicando la norma ASTM 3175.

Los resultados de este trabajo de investigación, son de vital importancia y utilidad en el desarrollo de nuevas investigaciones que buscan la conformación de barras de carbón compactadas a diferentes presiones y su aplicación como fuente de combustible en hornos que producen cerámica en el área fronteriza de San José de Cúcuta (Colombia) y los estados Táchira y Zulia en Venezuela. Esta investigación ya se encuentra en desarrollo.

**Agradecimientos:** Al Fondo de Investigaciones – FINU, de la Universidad Francisco de Paula Santander – UFPS-, quien financia esta investigación. Al Centro de Investigación en Materiales Cerámicos CIMAC-UFPS.

#### REFERENCIAS

1. G. Sehlke, P. Wichlacz, "U. S. Department of Energy's Role in the Energy-Water Nexus"; *Journal of Contemporary Water Research and Education*, Issue 143(2009), p. 56-62
2. Y. Hiroaki, M. Nobuhiro and T. Makoto, "Coal Firing Power Generation Technology"; *Journal of the Japan Institute of Energy*, Vol. 82 (2003), p. 822-829
3. C. M. F. Vieira and S. N. Monteiro, "Incorporation of solids wastes in red ceramics – an update review"; *Revista Materia*, Vol. 14 (2009), p. 881-905
4. J. Santurio Díaz, "Corrección y mejora del análisis de humedad del carbón térmico por medios no destructivos en tiempo real"; 2002, Universidad de Oviedo.
5. L. R. Plitt, "Basic physical principles of on-line coal ash and moisture measurement"; Seminar on coal moisture and ash on-line analyzers, 1998.
6. J. F. Unsworth; D. J. Barra; P. T. Roberts, "Coal Quality and Combustion Performance. An international perspective"; *Coal Science and Technology*, Vol. 19 (1991), p. 638.
7. O. Valbuena, "Efecto de la distribución de tamaño de partícula en la conductividad térmica de polvos de carbón usados en la elaboración del combustible tipo CCTA"; 2007. Universidad Francisco de Paula Santander.
8. P. Florez, "Mercado Nacional e internacional del carbón colombiano"; 2006, Ministerio de Minas y energía.
9. Decagon Devices, Inc. [en línea]. <<http://www.ictinternational.com.au/kd2.htm>> [citado en 1 de octubre de 2009]
10. A. Fontana, J. Wacker, B. Campbell, S. Colin and G. Campbell, "Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Food and Soils"; Annual international Meeting Sponsors by ASAE, 2001, p. 1-7
11. A. Fontana, J. Varith, J. Ikediala, J. Reyes, and B. Wacker, "Thermal Properties of Selected Foods Using A Dual Needle Heat-Pulse Sensor";. Paper Number: 996063. Annual International Meeting Sponsored by ASAE, 1999, p. 1-10
12. A. Dragan and R. Scitovski, "The existence of optimal parameters of the generalized logistic function"; *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 77 (1996), p. 281-294.