

## Determinación de la conductividad térmica de menas lateríticas a partir del método de Hot-Ball

### Determining thermal conductivity of lateritic ores from Hot-Ball method

Carlos Zalazar-Oliva<sup>1\*</sup>, Ever Góngora-Leyva<sup>1</sup>, Yoalbys Retirado-Mediaceja<sup>1</sup>, Andrés Adrian Sánchez-Escalona<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Moa, Holguín, Cuba

<sup>2</sup>Empresa Moa Nickel S.A.- Pedro Sotto Alba, Moa, Holguín, Cuba

\*Autor para correspondencia: [czalazar@ismm.edu.cu](mailto:czalazar@ismm.edu.cu)

#### Resumen

La conductividad térmica de las menas lateríticas se determinó mediante el método transitorio conocido comúnmente como *Hot-Ball*. Para ello se construyó una instalación experimental y se aplicó un diseño de experimento que analiza el comportamiento de esta propiedad para tres valores de temperatura. Se obtuvo que la conductividad térmica de la laterita adquiere valores de 1,5 W/(m·K) a 3,5 W/(m·K). Se establece un modelo ajustado con una correlación de 0,98 que estima el valor de la conductividad térmica de las menas lateríticas para los rangos de temperatura de 40 °C a 70 °C.

**Palabras clave:** conductividad térmica; menas lateríticas; método Hot-Ball; modelación matemática.

#### Abstract

The thermal conductivity of lateritic ores was determined by using the transitory commonly known Hot-Ball method. An experimental facility was built and an experimental design was used for analyzing the property performance for three temperature values. It was obtained the thermal conductivity of lateritic reaches values from 1.5 to 3.5 W/ (m.k). An adjusted model of 0.98 correlations that estimates the thermal conductivity for the lateritic ores with temperature ranges of 40 °C to 70 °C was established.

**Keywords:** Thermal conductivity; lateritic ores; Hot-Ball method; mathematical modeling.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El níquel es un elemento esencial en la fabricación de aceros inoxidable y otras aleaciones, el cual proporciona a los materiales propiedades como: durabilidad, resistencia a la corrosión, ductilidad, conductividad térmica y eléctrica. Este metal se encuentra en la naturaleza formando sulfuros, óxidos o silicatos, aunque en un 60 % aparece como un óxido de hierro y níquel, comúnmente conocido como laterita (Keskinilic *et al.* 2016).

La extracción y tratamiento de la laterita involucra seis operaciones fundamentales: minería, secado, molido, reducción, lixiviación y calcinación (Díaz 2016). En particular, en el secado, usualmente se emplean secadores rotatorios, por su alta productividad y la amplia variedad de materiales que pueden procesar (Ponce, Royo y Reynoso 2018). La principal problemática de estos secadores radica en su alto consumo energético y su relativa baja eficiencia si se comparan con otros equipos de intercambio de energía y materia (Iguaz *et al.* 2003; Krokida, Marinos-Kouris y Mujumdar 2007). Investigaciones realizadas en industrias metalúrgicas para la producción de níquel y cobalto (Strumillo, Jones y Romuald 2006) estiman que el secado consume aproximadamente el 23 % de la energía que se emplea en la producción.

Lo antes expuesto ha motivado estudios de modelación, simulación y evaluación del secado del mineral laterítico (Retirado *et al.* 2007; Retirado *et al.* 2012; Delgado-Drubey 2013) enfocadas a reducir los consumos energéticos y optimizar el funcionamiento de este proceso. Aunque estas investigaciones han aportado valiosos resultados han tenido como limitante el hecho de emplear las propiedades termofísicas de materiales similares, como lo es el mineral laterítico reducido.

La laterita reducida, aunque es un subproducto del tratamiento de las menas para la obtención de níquel y cobalto, difiere en las características físicas y químicas de la mena laterítica original; esta última se obtiene en su estado natural mientras la otra es el resultado de la reducción de los óxidos en ellas contenidos, por tanto, las propiedades termofísicas de ambos materiales no son las mismas.

En tal sentido, esta investigación tuvo el objetivo de determinar la conductividad térmica del mineral laterítico sin reducir, empleando para ello el método transitorio conocido como *Hot-Ball*.

Varios son los métodos y técnicas de determinación de las propiedades termofísicas de sólidos, líquidos o gases. Entre los más conocidos está el método absoluto, cuya propiedad se adquiere por medio de una ecuación de trabajo analítica, acompañada por correcciones debido a la desviación entre la situación real y el modelo ideal.

Otro método es el relativo, en el cual el instrumento empleado para la medición tiene una o más constantes que se evalúan por calibración con un material para el que la propiedad de transporte se conoce a la misma temperatura y presión de interés.

Por otro lado, se han implementado algunas técnicas para medir conductividad térmica de disímiles materiales en diversos intervalos de estados termodinámicos, como son las técnicas de estados transitorios y las de estado estable.

Las mejoras en la metodología de los métodos transitorios y el uso de elementos electrónicos recientes permiten la construcción de instrumentos portátiles y sistemas de monitoreo que simplifican significativamente la operación. Hasta ahora, la sonda de aguja y los sensores de puente de calor han sido los más utilizados en instrumentos portátiles (Hammerschmidt y Sabuga 2000; Kubicar *et al.* 2010).

El método transitorio conocido como Hot-Ball (HB) se ha empleado en los últimos 20 años y se ha generalizado en los laboratorios de investigación, así como en aplicaciones tecnológicas, para medir las propiedades termofísicas. Las principales diferencias entre los métodos clásicos y transitorios se encuentran en la variedad del tamaño de muestra, tiempo de medición y número de parámetros medidos (Kubicar *et al.* 2010). Estos métodos necesitan, para una medición, un tiempo significativamente más corto que los métodos clásicos; además, algunos de ellos pueden usarse para determinar el calor específico, la difusividad térmica y la conductividad térmica dentro de una sola medición (Kubicar y Bohac 1999).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Principio de Hot-Ball**

El método HB se basa en el análisis de la evolución transitoria de la temperatura de una esfera de metal cuando se impone una condición de calentamiento escalonado. Con las propiedades conocidas de la esfera, la geometría de la esfera y la calibración adecuada se pueden determinar algunas de las propiedades termofísicas de materiales como líquidos y sólidos granulados (Flores-Cuautle y Lara-Hernández 2017).

En este método se emplea una esfera pequeña que en su interior tiene una resistencia para generar calor y al mismo tiempo un sensor que mide los cambios de temperatura en el medio circundante dentro de un radio  $R$  (Figura 1a).

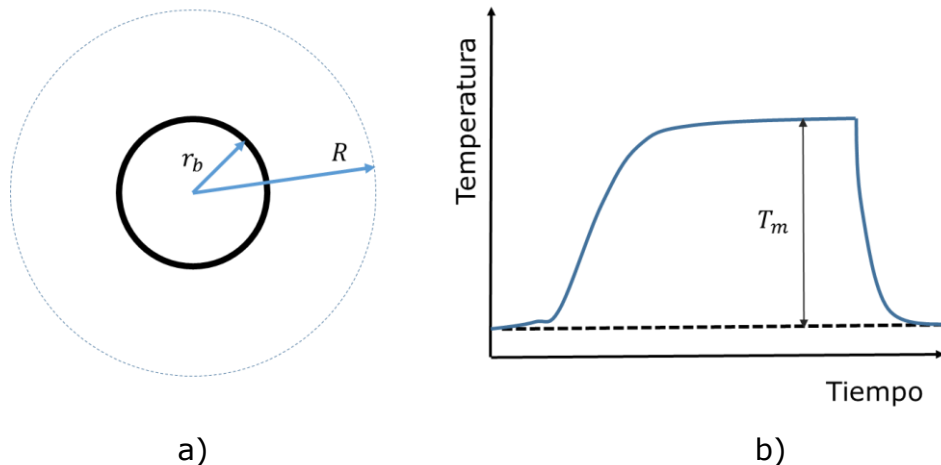


Figura 1. Boceto de la HB. a) Corte transversal de la HB de radio  $r_b$ ; b) Respuesta de temperatura correspondiente transmisión un flujo de calor constante.

Cuando después de un tiempo la respuesta de temperatura se estabiliza a un valor constante se determina el gradiente de temperatura ( $T_m$ ) entre el valor inicial y el valor estable de la temperatura, como se muestra en la Figura 1b. Esta diferencia de temperatura se emplea para determinar la conductividad térmica del medio circundante.

La ecuación de trabajo del sensor (HB) se basa en un modelo ideal, en el cual se asume un flujo de calor constante ( $q$ ) desde la esfera hueca de radio  $r_b$  hacia el medio infinito. Entonces, la distribución de temperatura dentro del medio se caracteriza por la función (1) (Carslaw y Jaeger 1986). El término  $erfc(x)$  es la función de error complementario, cuya expresión se muestra en (2).

$$T(r,t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda} \left\{ erfc\left(\frac{r-r_b}{2 \cdot \sqrt{at}}\right) - \exp\left(\frac{r-r_b}{r_b} + \frac{at}{r_b^2}\right) erfc\left(\frac{r-r_b}{2 \cdot \sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{r_b}\right) \right\} \quad (1)$$

$$erfc(x) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^x (-\zeta^2) d\zeta \quad (2)$$

Donde:

$T(r,t)$ : Temperatura de la muestra que depende del radio el tiempo

$\lambda$  : conductividad térmica del medio circundante

$at$  : la difusividad térmica del medio circundante

$r_b$ : radio de la esfera

$r$ : radio de penetración del calor en la muestra

$q$ : Calor suministrado a la esfera

La ecuación (1) es una solución de la ecuación diferencial parcial para la conducción de calor para  $r \geq r_b$ , considerando las siguientes condiciones límite e iniciales:

$$T(r,t) = 0, \quad t = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = -\frac{q}{4\pi \cdot r_b^2} \quad r = r_b, t > 0$$

Suponiendo que la temperatura se mide en la superficie de la esfera hueca  $r=r_b$ , entonces la ecuación (1) se simplifica y se obtiene la ecuación (3).

$$T(t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{at}{r_b^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{at}}{r_b}\right) \right\} \quad (3)$$

En largos períodos de tiempo ( $t \rightarrow \infty$ ) la ecuación (3) se modifica y se forma la ecuación de trabajo (4), que permite determinar la conductividad térmica (Silva *et al.* 2012; Kouyaté *et al.* 2015).

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot r_b \cdot T_m(t \rightarrow \infty)} \quad (4)$$

Donde:

$T_m$ : variación de la temperatura entre valor inicial con el valor estabilizado de la respuesta de temperatura.

Para la experimentación en este estudio se construyó una instalación con los elementos representados en la Figura 2 y se aplicó el procedimiento que a continuación se expone.

## 2.2. Procedimiento para la experimentación

Se calibró el sensor con agua común, comprobándose que el error entre el valor calculado por el método de Hot-Ball y los valores reportados por la literatura especializada fueran de 0,05 % a 0,1 %. Verificada la calibración

se aplicó el análisis de las muestras de mineral laterítico; para ello se depositaron las muestras en recipientes de vidrio con un diámetro de 50 mm recubierto con un material aislante para reducir el intercambio térmico con el medio. Luego se colocó el sensor dentro de la muestra garantizando que estuviese totalmente cubierto.

Después de calentar la muestra hasta valores muy próximos ( $\pm 5$  °C) a la temperatura deseada se generó calor en la esfera mediante el suministro de corriente eléctrica a la resistencia que se encuentra en el interior de la esfera. Esto provoca cambios de temperaturas en la muestra durante el tiempo que se suministra calor, los cuales son registrados por el otro sensor (termopar) de la HB y almacenados en una base de datos en el ordenador para su posterior análisis.

Para determinar la conductividad térmica del material se empleó la ecuación (4), que tiene en cuenta el calor suministrado a la muestra por medio de la esfera, la variación de temperatura media y las propiedades físicas y térmicas de la esfera Hot-Ball.

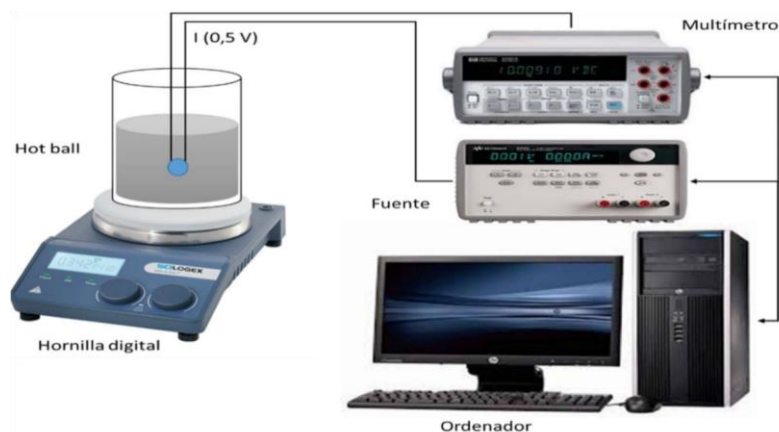


Figura 2. Esquema experimental empleado para Hot-Ball.

### 2.3. Diseño de experimento

Se analizaron varias temperaturas de estado de las muestras y se repitió el experimento tres veces a cada temperatura. Los valores iniciales de temperatura de las muestras fueron de 40 °C, 55 °C, y 70°C.

Se fijaron diferentes valores de temperatura por diversas razones; en primer lugar, la conductividad térmica -según la ley de Fourier (ecuación 5)- depende en gran medida de la temperatura (Incropera *et al.* 2006).

$$\lambda = \frac{q'' \partial x}{\partial T} \quad (5)$$

Se conoce, además, que el efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica puede ser distinto para cada materia. En algunos materiales una elevación de la temperatura aumenta la conductividad térmica, mientras en otros sucede lo contrario, por lo que este procedimiento permitirá determinar cómo se relacionan ambas propiedades en la laterita.

La otra razón por la que se establecieron esos valores de temperatura es que durante el proceso de secado las menas lateríticas entran al proceso con una temperatura aproximada de 28 °C a 30 °C y salen del secador a temperaturas cercanas a los 70 °C, lo cual puede implicar cambios en la conductividad térmica.

Para la experimentación se tomaron tres muestras de diferentes yacimientos con características similares. Se realizaron tres mediciones para tomar el valor promedio de la conductividad térmica a cada valor de temperatura.

En las muestras el contenido de metales fue el siguiente: Ni (1,18 % a 1,24 %); Fe (36,5 % a 40,69 %); Co (0,090 % a 0,101 %); SiO<sub>2</sub> total (10,05 % a 13,0 %); MgO (4,29 % a 7,0 %). La humedad fue de 36,8%.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Respuesta de la temperatura medida con el sensor

En la Figura 3 se muestra la respuesta de la temperatura escaneada punto por punto de la muestra analizada a diferentes temperaturas iniciales. Se pudo comprobar que cuando se le suministra corriente a la resistencia ocurre un pequeño incremento de la temperatura. Transcurridos unos 35 s la temperatura se ha estabilizado y al dejar de suministrar calor esta tiende a volver a su temperatura inicial.

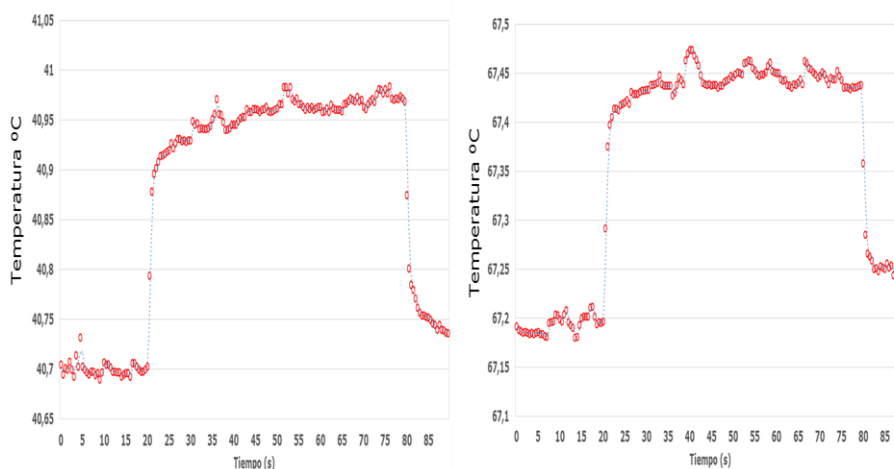


Figura 3. Respuesta de la temperatura de la muestra para los valores iniciales de 40 °C y 67 °C.

Para determinar el valor de  $T_m$  fue necesario realizar algunas consideraciones debido al incremento de temperatura al finalizar las mediciones. El procedimiento fue tomado de la investigación hecha por Kubicar y demás colaboradores (2010), el cual obtiene en su experimentación resultados similares.

Primeramente se aproximó la línea base conectando los puntos obtenidos al comenzar la prueba con los puntos al finalizar. Luego, la temperatura  $T_m$ , incluida en el cálculo, se establece como una diferencia entre esta línea de base y la correspondiente al punto de la respuesta de temperatura después del inicio de calentamiento, como se muestra en la Figura 4.

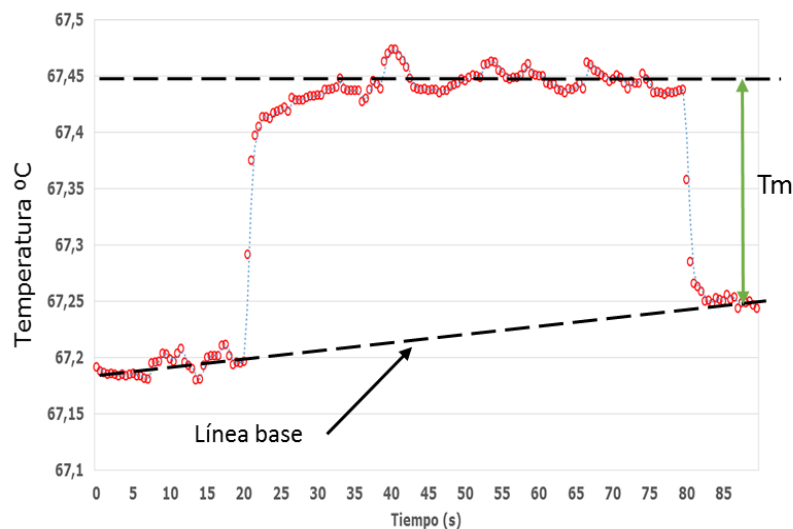


Figura 4. Ajuste de la línea base para la determinación de  $T_m$ .

### 3.2. Conductividad térmica

Los resultados derivados de los cálculos de la conductividad térmica mediante la ecuación (4) se reflejan en la Tabla 1, en la cual se exponen los valores alcanzados en las réplicas y los promedios por temperatura para las tres muestras de menas lateríticas.

Tabla 1. Conductividad térmica del mineral laterítico húmedo (36,5 %)

Temperatura Muestra	40 °C				55 °C				70 °C			
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_{Pr}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_{Pr}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_{Pr}$
<b>SM3-1</b>	1,37	1,60	1,92	1,63	1,53	1,96	2,22	1,90	3,26	3,01	4,07	3,44
<b>SM3-2</b>	1,89	1,66	1,67	1,74	1,99	1,68	2,15	1,94	3,22	3,25	3,25	3,24
<b>SM3-3</b>	1,79	1,36	1,76	1,69	1,69	2,15	1,88	1,90	2,99	2,38	3,99	3,12



Se encontró que la conductividad térmica de las menas lateríticas están dentro de los rangos de 1,5 W/(m·K) a 3,5 W/(m·K) para temperaturas entre los 40 °C y 70 °C. Estos valores fueron comparados con materiales conocidos, como es el caso de la tierra húmeda. A pesar de que los valores estimados mediante la experimentación para la mena laterita son mayores que los reportados por la literatura para la tierra húmeda ( $\lambda = 0,8$  W/(m·K) a 1 W/(m·K)) se pueden considerar correctos, ya que el material estudiado está compuesto en su mayoría por materiales altamente conductores del calor, por lo cual su conductividad térmica debe ser mayor que la conductividad térmica correspondiente a la tierra común.

### 3.3. Modelo matemático

Partiendo de los valores promedios de la conductividad térmica se obtuvo un modelo para determinar la conductividad térmica de las menas lateríticas en función de la temperatura. La Figura 5 muestra los resultados de ajustar una ecuación cuadrática para describir la relación entre la conductividad térmica y la temperatura, obteniéndose la ecuación (6) del modelo ajustado.

Mediante el estadístico  $R^2$  se determinó que el modelo ajustado explica el 96,08 % de la variabilidad en la conductividad térmica y el coeficiente de correlación resultó ser igual a 0,96; lo que indica una relación robusta entre la temperatura y la conductividad térmica.

$$\lambda = 0,002 \cdot T_{ml}^2 - 0,1658 \cdot T_{ml} + 5,2828 \quad (6)$$

Donde:

$T_{ml}$ : temperatura del mineral laterítico; °C

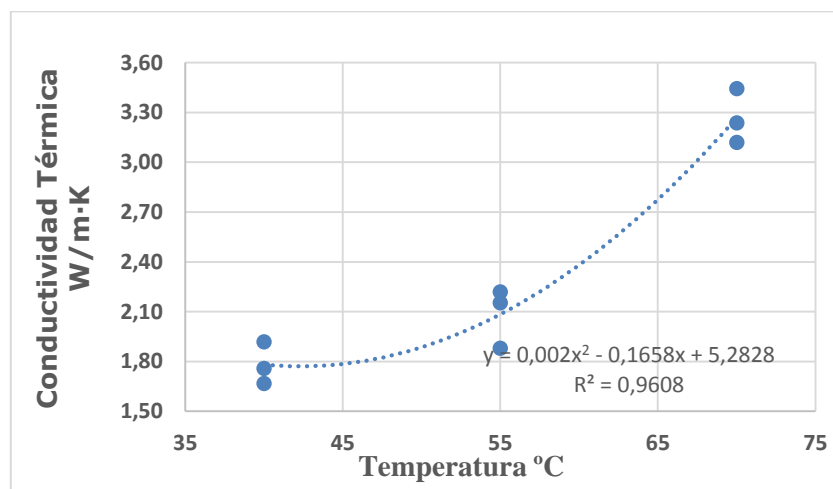


Figura 5. Correlación lineal entre la temperatura y la conductividad térmica.

#### 4. CONCLUSIONES

- El método de Hot Ball revela, para rangos de temperatura de 40 °C a 70 °C, valores de conductividad térmica entre los 1,5 W/(m·K) a 3,6 W/m·K en las menas lateríticas.
- El modelo matemático lineal expresado en la ecuación (6) de este trabajo permite determinar, en menas lateríticas, la conductividad térmica en función de la temperatura. Este modelo puede ser empleado con suficiente exactitud para soluciones ingenieriles dentro del rango de temperatura de 40 °C a 70 °C.

#### 5. REFERENCIAS

- Carslaw, H. S. y Jaeger, J. C. 1986: *Conduction of heat in solids*. 2 ed. U.S.A.: Oxford University Press. 520 p. ISBN-10: 0198533683.
- Delgado-Drubey, Y. 2013: *Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Díaz, S. C. 2016: *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Flores-Cuautle, J. y Lara-Hernández, G. 2017: Thermal Properties of Jojoba Oil Between 20°C and 45°C. *International Journal of Thermophysics*, 38(115). Doi: 10.1007/s10765-017-2252-4.
- Hammerschmidt, U. y Sabuga, W. 2000: Transient hot wire (THW) method: uncertainty assessment. *International Journal of Thermophysics*, 21(6): 1255-1278.
- Iguaz, A.; Esnoz, A.; Martínez, G.; López, A. y Virseda, P. 2003: Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of food engineering*, 59(2-3), 151-160.
- Incropera, F. P.; Lavine, A. S.; Bergman, T. L. y DeWitt, D. P. 2006: *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. John Wiley & Sons Inc. 1024 p.
- Keskinkilic, E.; Pournaderi, S.; Geveci, A. y Topkaya, Y. A. 2016: A Study on the Characterization of Nickel Laterites of Central Anatolia. In: 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing (pp. 403-410). Springer, Cham.
- Kouyaté, M.; Flores-Cuautle, J. J. A.; Slenders, E.; Sermeus, J.; Verstraeten, B.; Ramirez, B. G. y Glorieux, C. 2015: Study of Thermophysical properties of silver nanofluids by ISS-HD, Hot Ball and IPPE techniques. *International Journal of Thermophysics*, 36(10-11): 3211-3221.

- Krokida, M.; Marinos-Kouris, D. y Mujumdar, A. S. 2007: *Rotary Drying. Handbook of Industrial Dryin*. Taylor & Francis: Philadelphia.
- Kubicar, L. U.; Vretenár, V.; Stofanik, V. y Bohac, V. 2010: Hot-ball method for measuring thermal conductivity. *International Journal of Thermophysics*, 31(10): 1904-1918.
- Kubicar, L. y Bohac, V. 1999: Review of several dynamic methods of measuring thermophysical parameters. *Thermal Conductivity*, 24: 135-149.
- Ponce, R.; Royo, F. J. y Reynoso, A. G. 2018: Modelo matemático de un secadero rotatorio: secado de biomasa sólida lignocelulósica. *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, 6(2): 031-043.
- Retirado, Y.; Góngora, E.; Torres, E. y Rojas, A. L. 2007: Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. *Minería y Geología*, 23(3): 1-19.
- Retirado, Y.; Legrá, A. A.; Lamorú, M.; Torres, E. y Laurencio, H. L. 2012: Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel. *Minería y Geología*, 28(2): 30-46.
- Silva, M. G.; Lira, T. S.; Arruda, E. B.; Murata, V. V. y Barrozo, M. A. S. 2012: Modelling of fertilizer drying in a rotary dryer: parametric sensitivity analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(2): 359-369.
- Strumillo, C.; Jones, P. y Romuald, Z. 2006: Energy aspects in drying. In: *Handbook of Industrial Drying*. Second edition. p. 1241-1266. New York: Marcel Dekker. 730 p.

Recibido: 26/04/2019

Aceptado: 04/07/2019