

Análisis del secado natural de la mena laterítica: influencia de la inclinación de las pilas

**Dr. C. Yoalbys Retirado Mediaceja^{1*}; PhD. Héctor Luis Laurencio-Alfonso²;
Dr. C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina^{1**}; M. Sc. Amauris Gilbert
Hernández^{1***}; M. Sc. Marbelis Lamorú Urgelles^{1***}**

yretirado@ismm.edu.cu; hector.laurencio@utc.edu.ec; alegra@ismm.edu.cu; aghernandez@ismm.edu.cu; mlamoru@ismm.edu.cu;

**1 Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
2 Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Avenida Simón Rodríguez s/n. Barrio El
Ejido. Sector San Felipe. Latacunga, Ecuador.**

*** Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa
** Departamento de Matemática
*** Departamento de Ingeniería Mecánica**

Resumen

En la industria cubana del níquel el secado natural se implementa almacenando la mena laterítica a granel y a la intemperie. La confección de las pilas se realiza sin valorar rigurosamente la incidencia que tiene, en el comportamiento energético del proceso, la inclinación de la superficie de secado. En la presente investigación se demuestra, a través de simulaciones, que el incremento de la inclinación en pilas triangulares reduce notablemente el rendimiento del secado natural. Además, se patentiza que la implementación del proceso debe realizarse con pilas inclinadas alrededor de 45 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal.

Palabras clave: inclinación; pilas; secado natural; mena laterítica.

Recibido:

Aprobado:

1. INTRODUCCIÓN

El secado natural de la mena laterítica, desde el punto de vista científico-técnico, ha suscitado interés en los investigadores de la industria cubana del níquel y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM). En los estudios realizados se observan dos marcadas tendencias en el análisis del proceso.

Los primeros, esencialmente se enfocan al diseño y desarrollo de una tecnología de secado solar. La misma tiene en cuenta la determinación de los criterios técnico-prácticos de la minería que influyen en el manejo integral y eficiente de las pilas de mena laterítica en los depósitos mineros de las empresas productoras de níquel y cobalto (Estenoz 2001; Estenoz *et al.* 2007; Estenoz 2009; Vinardell, 2011).

Los segundos, abordan la evaluación térmica del proceso. En una primera etapa, priorizaron el análisis teórico-experimental de la desorción de la humedad en la mena laterítica, en función de las variables climatológicas y las propiedades termofísicas del material que más influyen en el secado natural (Retirado *et al.* 2011). Posteriormente, desarrollaron la modelación físico-matemática y la optimización de los parámetros fundamentales del proceso, considerando las condiciones de explotación en que el mismo se desarrolla en la industria cubana del níquel (Retirado & Legrá 2011; Retirado *et al.* 2012a).

En ambos casos, los investigadores cubanos coinciden con la literatura internacional en que un análisis riguroso del proceso de secado, sea convencional o natural, transita necesariamente por la determinación de sus parámetros fundamentales (Sunil & Sharma 2013; Borah *et al.* 2015; Olawale *et al.* 2015; Reza & Reza 2015; Sallam *et al.* 2015).

En el proceso analizado estos parámetros se pueden integrar en uno: la distribución de humedad que experimenta el material. La misma depende del área de exposición y el volumen de las pilas; la radiación solar que incide en la superficie de secado; los flujos de calor transferidos; y la distribución de temperatura del material. Estas variables son función de múltiples factores, entre lo que se destaca la inclinación de la superficie de secado de las pilas.

La distribución de humedad que experimenta la mena laterítica durante el secado natural se ha determinado previamente (Retirado *et al.* 2015). Los cálculos fueron desarrollados para pilas con una inclinación específica (61 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal), por ser la utilizada empíricamente en la implementación del proceso en las empresas niquelíferas.

Sin embargo, en el secado natural de la mena laterítica la captación de la energía solar está influenciada por los efectos de sombra que se producen debido a la combinación de la inclinación de la superficie y el movimiento del Sol. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera de utilidad práctica calcular y simular la distribución de humedad que experimenta el material para diferentes inclinaciones de la superficie de secado de las pilas.

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia que tiene, en el proceso de secado natural de la mena laterítica, la inclinación de la superficie de las pilas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó la modelación matemática desarrollada por Retirado (2012b) y se incorporó la sistematización del cálculo de los parámetros siguientes: flujos de calor transferidos; y distribución de temperatura y humedad que experimenta el material en las pilas.

Las simulaciones se realizaron para pilas de minerales de 140 y 5,49 m de longitud y ancho de la base, respectivamente; con sección transversal triangular e inclinaciones de la superficie de secado de 30; 45; 60 y 75 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal. Se utilizó la aplicación informática "SecSolar", la cual es útil para el análisis energético del proceso investigado (Retirado *et al.* 2012a).

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

3.1. Flujos de calor transferidos

En el secado solar natural la transmisión de calor ocurre por convección, radiación y conducción (Duffie & Beckman 1991; Mujumdar 2006; Abdel-Rehim & Nagib 2007). Por su parte, el intercambio de calor convectivo entre la corriente de aire y la superficie de secado de las pilas de mena laterítica, en el referido proceso, se produce indistintamente por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.* 2011).

En la Figura 1 se muestran las ecuaciones necesarias para calcular el coeficiente convectivo del aire, a partir del número de *Nusselt* (Nu), los flujos de calor por convección (q_{Conv}) y radiación (q_{Rad}), así como el calor total disponible para el secado natural (q_{Total}).

Nótese que el parámetro q_{Total} se calcula de forma dinámica como una función de los flujos de calor transferidos por radiación y convección. A continuación se sistematiza el procedimiento de cálculo (Figura 1).

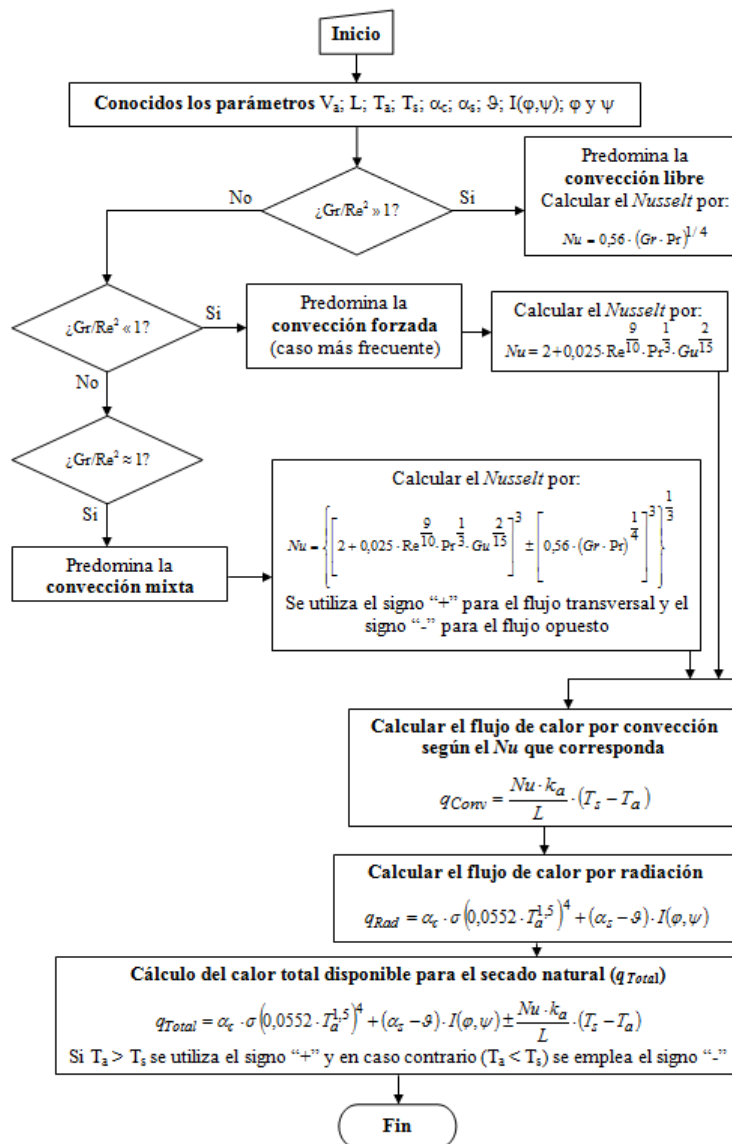


Figura 1. Flujograma que sistematiza el cálculo del calor total disponible para el proceso de secado natural.

Siendo:

V_a : velocidad del aire; m/s.

L : longitud característica de la superficie de secado; m.

T_a : temperatura del aire; K.

T_s : temperatura de la superficie de secado de la pila; K.

α_c : absortividad del cielo; adimensional.

α_s : absortividad solar de la mena laterítica; adimensional.

ρ : reflectividad de la mena laterítica; adimensional.

$I(\varphi, \psi)$: radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila; W/m^2 .

φ : inclinación de la superficie de la pila respecto al plano horizontal; grados sexagesimales.

ψ : orientación de la superficie de la pila respecto al eje norte-sur; grados sexagesimales.

Gr ; Re ; Nu ; Pr y Gu : números de *Grashof*, *Reynolds*, *Nusselt*, *Prandtl* y *Gujman*, respectivamente; adimensionales.

q_{Conv} : flujo de calor por convección que intercambian el aire y la superficie de secado de la pila; W/m^2 .

k_a : conductividad térmica del aire; $W/m \cdot K$.

q_{Rad} : flujo de calor por radiación que se aprovecha en el secado natural de la mena laterítica; W/m^2 .

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$); $W/m^2 \cdot K^4$.

q_{Total} : calor total disponible para el proceso de secado natural; W/m^2 .

El flujo de calor transferido por conducción (q_{Cond}), desde la superficie de secado hacia el interior de la pila de minerales, puede ser calculado mediante el procedimiento que se sistematiza en el flujograma de la Figura 2. Como se aprecia, este parámetro depende de otras variables entre las que se destacan la temperatura de la mena laterítica en la superficie de la pila [$T_s(\tau)$] y la temperatura en el interior de la pila en el espesor ξ [$T(\xi, \tau)$].

De acuerdo con Retirado *et al.* (2014), la primera se calcula como una función de dos parámetros principales: la radiación solar global incidente en la superficie de secado de la pila [$I(\varphi, \psi)$] y el calor transmitido por convección (q_{Conv}). La segunda, se determina obteniendo la distribución de temperatura [$T(y, \tau)$], para ello fue necesario resolver la ecuación de difusión del calor reportada en la literatura (Bergman *et al.* 2011), con las condiciones iniciales y de frontera propias del proceso investigado.

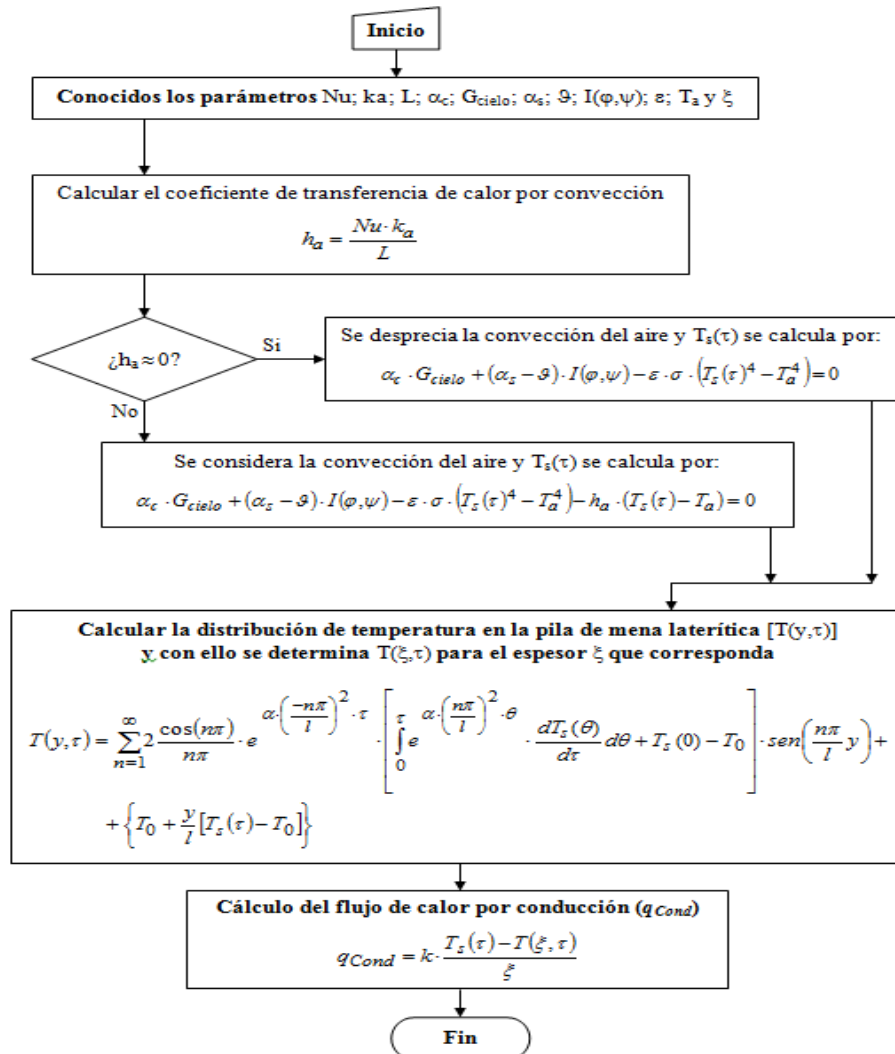


Figura 2. Flujograma que sistematiza el cálculo de la distribución de temperatura del material y el flujo de calor por conducción.

Siendo:

G_{cielo} : irradiación del cielo; W/m^2 .

ε : emisividad de la mena laterítica; adimensional.

h_a : coeficiente de transferencia de calor por convección; $W/m^2 \cdot K$.

$T_s(\tau)$: temperatura en la superficie de la pila en el instante τ ; K.

$T(y, \tau)$: distribución de temperatura del material en la pila; K.

q_{Cond} : calor transferido por conducción hacia el interior de la pila; W/m^2 .

k : conductividad térmica de la mena laterítica; $W/m \cdot K$.

$T(\xi, \tau)$: temperatura en el interior de la pila en el espesor ξ ; K.

3.2. Distribución de humedad

La distribución de humedad que experimenta la mena laterítica $[H(y, \tau)]$, en una pila expuesta a secado natural, puede ser determinada mediante el modelo que se expone en la Figura 3 (Retirado *et al.* 2012b). Nótese que este parámetro depende del término $H_s(\tau)$, el cual se calcula en función del régimen de secado (N) que predomine.

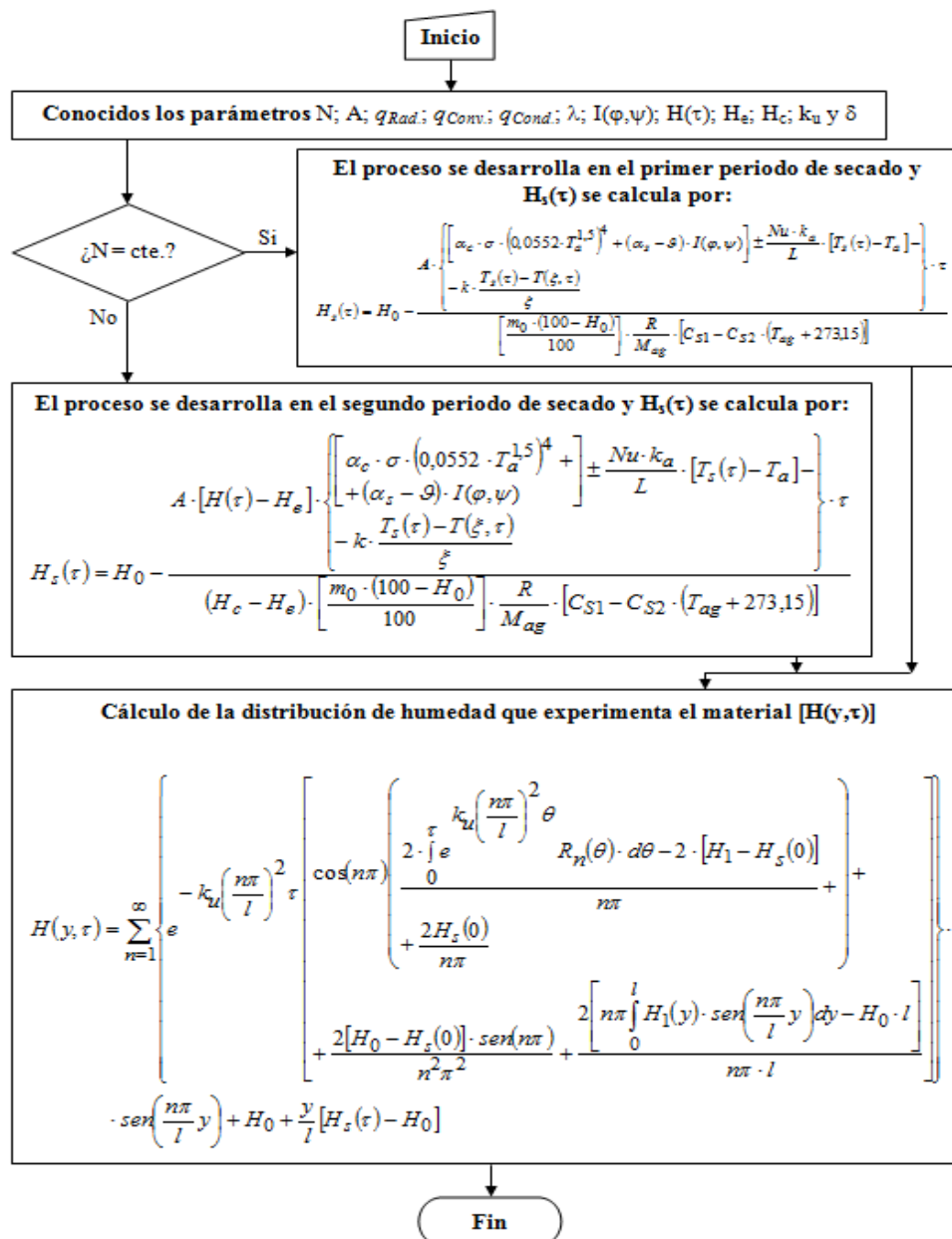


Figura 3. Flujograma que sistematiza el cálculo de la distribución de humedad que experimenta el material.

Siendo:

N : régimen de secado; $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

A : área de exposición de la pila; m^2 .

λ : calor latente de vaporización del agua; J/kg .

H_e : humedad de equilibrio del material; kg/kg .

H_c : humedad del material al finalizar el régimen de velocidad de secado constante; kg/kg .

δ : coeficiente térmico de conducción de humedad; $1/^\circ\text{C}$.

m_0 : masa inicial de material sin secar; kg .

R : constante de los gases; $\text{J}/\text{kmol}\cdot\text{K}$.

M_{ag} : peso molecular del agua; kg/kmol .

C_{s1} y C_{s2} : constantes experimentales; adimensionales.

T_{ag} : temperatura del agua; $^\circ\text{C}$.

k_u : coeficiente de conducción de humedad; m^2/s .

H_0 : humedad inicial del material; kg/kg .

$H_s(\tau)$: humedad del material en la superficie de secado de la pila (para $y=l$) en el instante τ ; kg/kg .

Como se aprecia, en la Figura 3 se ha sistematizado el procedimiento para el cálculo de la distribución de humedad. En el mismo se integran los anteriores (Figuras 1 y 2), por cuanto para desarrollar este cálculo se requiere de los resultados precedentes.

4. SIMULACIONES

4.1. Distribución de temperatura

Los comportamientos mostrados para la distribución de temperatura, en las Figuras 4 y 5, evidencian que la superficie de secado de la pila (para altura $h = 1,52 \text{ m}$) incrementa su temperatura después de las 7:00 horas. Los valores adecuados para el secado (superiores a $50 \text{ }^\circ\text{C}$) se obtienen entre las 10:00 y las 16:00-16:30 horas, en los taludes Este y Oeste de la pila, respectivamente.

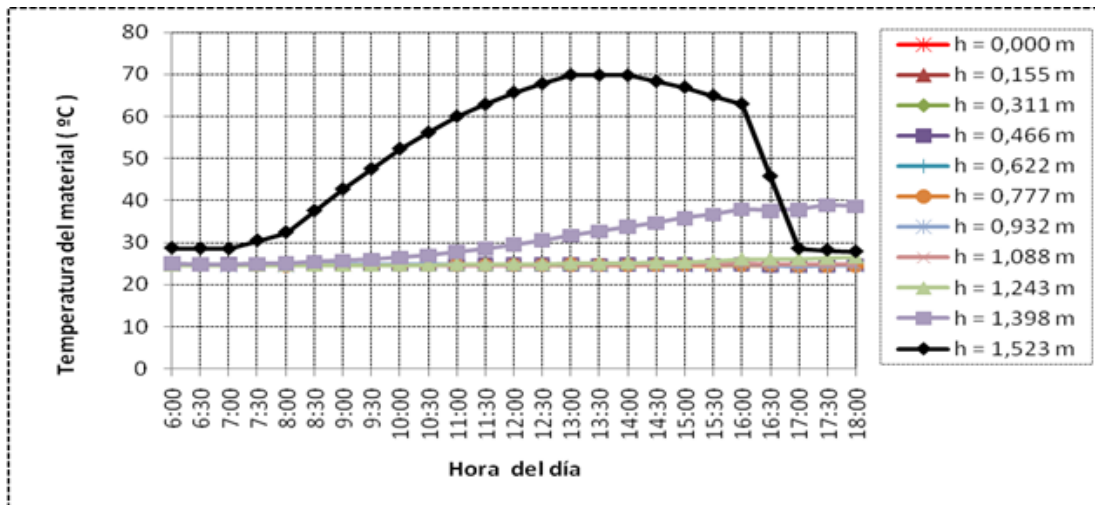


Figura 4. Distribución de temperatura en el talud Este de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

En ambos taludes para la altura $h = 1,39 \text{ m}$ se alcanzan valores superiores a los $30 \text{ }^\circ\text{C}$, a partir de las 13:00 horas, aunque el calentamiento del material se produce desde las 9:30 horas. En las restantes alturas consideradas la temperatura tiene un comportamiento aproximadamente constante e igual al valor inicial ($24,7 \text{ }^\circ\text{C}$). Lo anterior evidencia que la mena laterítica es un material mal conductor del calor, por cuanto la conducción térmica solo alcanza a las capas de material ubicadas a distancias iguales o inferiores a $12,5 \text{ cm}$ (Figuras 4 y 5).

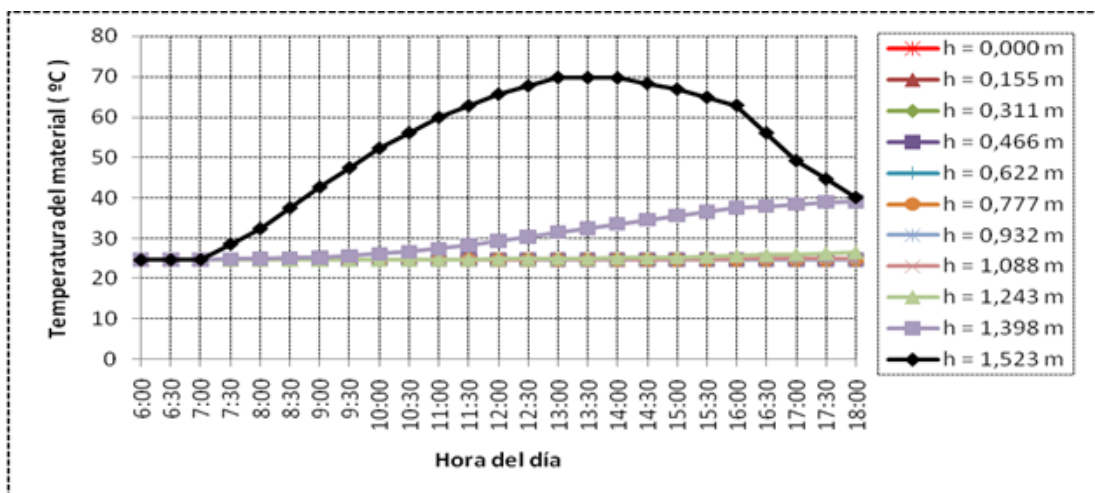


Figura 5. Distribución de temperatura en el talud Oeste de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

En ninguno de los taludes se logran incrementos significativos en la temperatura del material en la primera hora de secado, lo cual puede estar determinado por los bajos regímenes de radiación solar que inciden sobre la superficie de secado. Sin embargo, el enfriamiento superficial de la pila de mena laterítica, a partir de las 16:00 horas, tiene diferentes comportamientos (Figuras 4 y 5, para $h = 1,52$ m).

En el talud Este, el sólido de la superficie entrega calor bruscamente hasta valores cercanos a la temperatura inicial (Figura 4), esto puede ser atribuido al efecto de sombra que se produce debido a la combinación de la inclinación de la superficie de secado de la pila y la posición del Sol en ese horario. En el talud Oeste, la disminución de la temperatura es más moderada y el material a las 18:00 horas tiene alrededor de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5). El comportamiento es lógico, porque en ese horario el talud estuvo recibiendo radiación solar, a diferencia del lado Este de la pila.

Otro aspecto relevante a destacar es que, en ambos taludes, se produce almacenamiento de energía en forma de calor en la capa de material adyacente a la superficie (Figuras 4 y 5, para $h = 1,39$ m). La tendencia es prácticamente idéntica, lo cual puede ser asociado al hecho de que una variación en los regímenes de radiación solar no produce, a corto y mediano plazo, cambios significativos en la temperatura de material que se encuentra en el interior de la pila.

4.2. Distribución de humedad

En general, se observan reducciones en el contenido de humedad en las pilas de mena laterítica. Estas fueron de 5 y 5,5 % en los taludes Este y Oeste, respectivamente (Figuras 6 y 7). Las mismas están determinadas por el comportamiento descrito para la distribución de la temperatura en ambos taludes.

En el talud Este de la pila, se obtienen reducciones en la humedad del material a partir de las 8:30 y hasta las 16:30 horas. Sin embargo, en los restantes horarios la humedad de la mena laterítica permanece prácticamente invariable (Figura 6). En el talud Oeste, la disminución del parámetro es continua entre las 8:30 y las 18:00 horas (Figura 7).

Las capas de material ubicadas entre la base de la pila y $h = 1,24$ m, en los taludes Este y Oeste, reducen sus respectivos valores de humedad en un 4 y 4,5 %, respectivamente. Por su parte, las capas de lateritas más cercanas a la superficie de la pila (desde $h = 1,39$ m hasta $1,52$ m) los niveles de reducción de la humedad en los taludes oscilan entre 4,5 y 5 %.

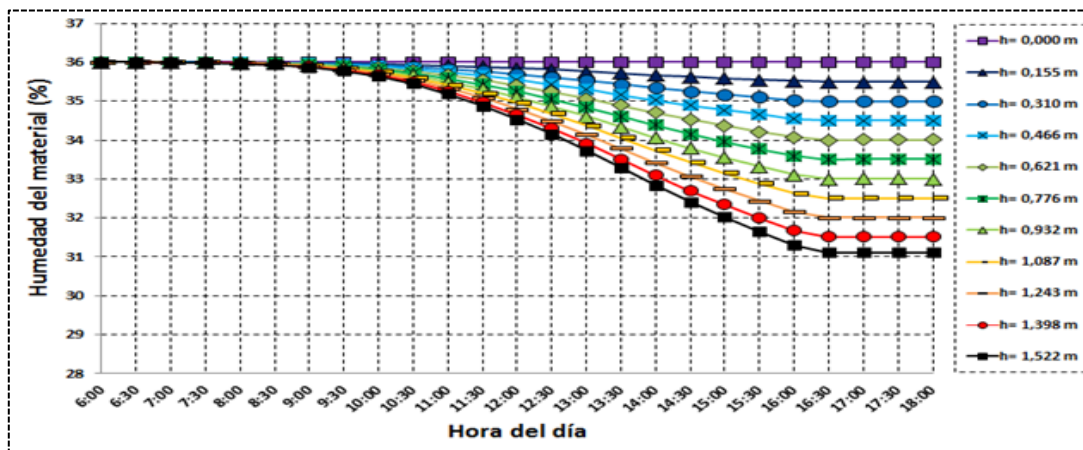


Figura 6. Distribución de humedad en el talud Este de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

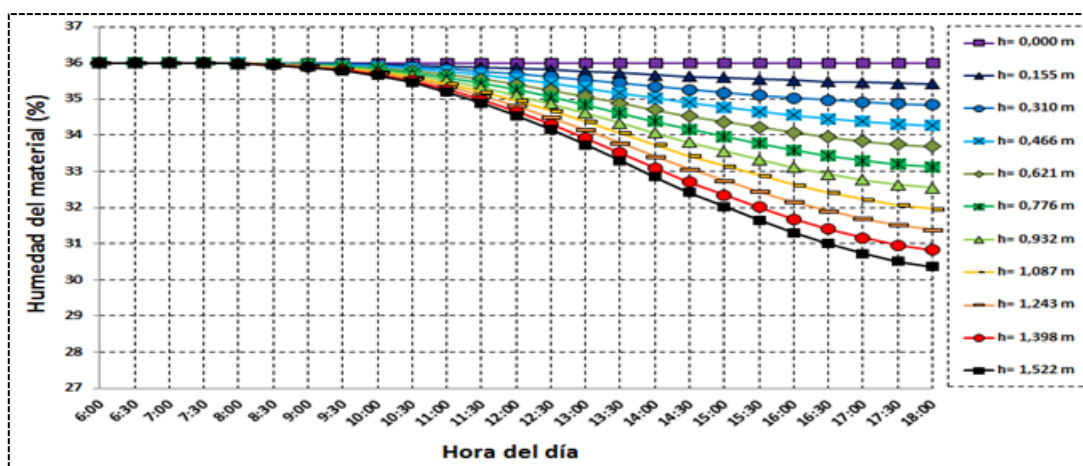


Figura 7. Distribución de humedad en el talud Oeste de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

4.3. Influencia de la inclinación en el secado

Al valorar los comportamientos de la distribución de temperatura en pilas expuestas a secado natural, pero con diferentes inclinaciones de la superficie (45; 60 y 75°, respecto al plano horizontal), se aprecia que los incrementos significativos en la temperatura de la mena laterítica (hasta 68; 65 y 60 °C, respectivamente) se obtienen en la superficie de secado, al igual que ocurrió para la inclinación de 30 grados sexagesimales.

Las pilas que tienen la superficie de secado inclinadas a 45 y 60° captan una cantidad de energía térmica que provoca que la conducción del calor alcance a las capas de material que se encuentran de la superficie a distancias iguales o inferiores a 16,1 y 9,3 cm; respectivamente. En la pila

inclinada en 75° la energía térmica captada solo induce un incremento de temperatura en la superficie y hacia el interior de la pila de la conducción de calor es prácticamente nula.

Estas tendencias son lógicas y demuestran que al incrementar la inclinación de la pila de 30 a 75°, la temperatura máxima de la superficie de secado disminuye de 70 a 60 °C y, por tanto, se reduce el efecto de secado que se produce en la mena laterítica.

La distribución humedad que experimenta el material, como se ha indicado, estuvo determinada por el comportamiento de la temperatura en cada inclinación estudiada. En las pilas con las superficies inclinadas a 45; 60 y 75° la mena laterítica disminuyó la humedad promedio en 2,75; 1,7 y 1,25 % en el talud Este, mientras que en el lado Oeste la disminución fue de 3,75; 2,75 y 2,25 %, respectivamente.

Los comportamientos descritos constituyen las regularidades del secado natural de la mena laterítica en pilas con diferentes inclinaciones de la superficie de secado. Estos sugieren que para la implementación del proceso, en la empresa niquelífera, debe evaluarse rigurosamente la inclinación que deben tener las pilas, porque ello influirá sobremanera en el rendimiento del secado. Lo anterior es congruente con los resultados obtenidos por Retirado *et al.* (2012a) en la optimización del proceso.

5. CONCLUSIONES

La inclinación de la superficie de secado, en pilas con sección transversal triangular, tiene una influencia notable en el comportamiento energético del secado natural de la mena laterítica. El incremento de la misma de 30 a 75 grados sexagesimales, respecto a la horizontal, redujo el rendimiento térmico del proceso de 14,58 a 4,86 %.

Las pilas de sección transversal triangular empleadas en la implementación del secado natural de la mena laterítica deben tener sus superficies de secado inclinadas en aproximadamente 45 ° sobre el plano horizontal. Lo anterior posibilita obtener grandes volúmenes de material expuesto a secado y adecuados rendimientos térmicos en el proceso.

6. REFERENCIAS

ABDEL-REHIM, Z. & Z. NAGIB. 2007: Solar drying of Bagasse Pulp. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(4): 300-306.

BERGMAN, T.; A. LAVINE; F. INCROPERA & D. DEWIT. 2011: *Fundamentals of*

heat and mass transfer. New Jersey, John Wiley & Sons, 1077 p.

- BORAH, A.; K. HAZARIKA & S. KHAYER. 2015: Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer. *Information Processing in Agriculture*, 2(2): 85-92.
- DUFFIE, J. & W. BECKMAN. 1991: *Solar engineering of thermal processes*. New York, Wiley Institution, 919 p.
- ESTENOZ, S.; A. ALDERÍ; N. BATISTA; A. DONATIÉN & N. PÉREZ. 2007: Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- ESTENOZ, S. 2001: Desarrollo sostenible en la minería a través del aprovechamiento integral de los yacimientos lateríticos. *Tecnología Química*, 21(3): 54 - 60.
- ESTENOZ, S. 2009: Sistema integral de explotación minera para desarrollo sostenible de recursos naturales y su procesamiento tecnológico. Casos de estudio. En: Memorias del III Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- MUJUMDAR, A. 2006: *Handbook of Industrial Drying*. Singapore, Taylor & Francis Group, LLC, 1286 p.
- OLAWALE, D.; A. ADEWOLE; A. OLAYEMI; O. IBUKUN & S. TOLULOPE. 2015: Solar drying kinetics of Cassava Slices in a mixed flow dryer. *Acta Technologica Agriculturae*, 18(4): 102-107.
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. 2012b: Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología*, 28(4): 1-19. Consultado: 21 enero 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. 2014: Distribución de temperatura en pilas de mena laterítica expuestas a secado natural. *Minería y Geología*, 30(1): 33-50. Consultado: 1 abril 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES; H. LAURENCIO & E. GÓNGORA. 2015: Velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie. *Minería y Geología*, 31(3): 45-61. Consultado: 5 febrero 2016. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ; M. LAMORÚ; E. TORRES & H. LAURENCIO. 2012a: Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel. *Minería y Geología*, 28(2): 30-46. Consultado: 10 diciembre 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.

- RETIRADO, Y.; A. LEGRÁ. 2011: Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. *Minería y Geología*, 27(2): 84 - 108. Consultado: 18 enero 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; E. GÓNGORA; E. TORRES; M. LAMORÚ & B. LEYVA. 2011: Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas ferroniquelíferas. *Minería y Geología*, 27(1): 1-21. Consultado: 1 mayo 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- REZA, O. & H. REZA. 2015: Influence Collector inclination of solar dryer on Apple 'Golab' Chips drying. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 80(2):101-108.
- SALLAM, Y.; M. ALY; A. NASSAR & E. MOHAMED. 2015: Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of Advanced Research*, 6(2):171-178.
- SUNIL, V. & N. SHARMA. 2013: Modelling the drying kinetics of green peas in a solar dryer and under open sun. *International Journal of Energy and Environment*, 4(4):663-676.
- VINARDELL, J. 2011: *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de Maestría. ISMMM. Moa. 63 h.