

Velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie

Yoalbys Retirado-Mediaceja
Aristides Alejandro Legrá-Lobaina
Marbelis Lamorú-Urgelles
Enrique Torres-Tamayo
Héctor Luis Laurencio-Alfonso
Ever Góngora-Leyva

Resumen

En este trabajo se establece, a partir del balance de energía térmica y el análisis de la transferencia de calor y masa en el secado natural, el modelo matemático para el cálculo y la simulación de la velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie, en la empresa productora de níquel y cobalto Comandante Ernesto Che Guevara de Moa. Las simulaciones evidenciaron que la velocidad de secado en las pilas fue, generalmente, inferior a 0,05 %/h y nula en determinados horarios de la mañana y la tarde en los taludes oeste y este, respectivamente.

Palabras clave: velocidad de secado; pila de mena laterítica; secado natural.

Drying velocity of lateritic ore stockpiles in the open

Abstract

This work establishes the mathematical model for the calculation and simulation of the drying velocity of lateritic ore stockpiles stored in the open in the nickel and cobalt production plant "Comandante Ernesto Che Guevara" of Moa based on the energy balance and the analysis of heat and mass transfer in the natural drying process. The results of the simulations show that the drying velocity of the piles generally was below 0,05 %/h and zero in certain hours in the morning and in the afternoon in the West and East Slopes respectively.

Keywords: drying velocity; lateritic ore stockpiles; natural drying

1. INTRODUCCIÓN

La modelación del secado de materiales porosos, utilizando aire caliente, implica la inclusión de fenómenos de transporte multifásicos acompañados por cambios de fase. El parámetro fundamental del proceso es la velocidad de secado, la cual depende principalmente de la temperatura, velocidad y humedad del aire, el área interfacial por unidad de volumen, el espesor del lecho y la naturaleza intrínseca del material, que determinará si el mecanismo de transporte de la humedad en su interior es por difusión líquida, difusión de vapor, capilaridad, convección o transporte mixto (Jiménez 1999).

Los modelos matemáticos más difundidos para el estudio de los procesos de transferencia de calor y masa consideran un equilibrio térmico local en cada punto del grano, originando modelos formados por ecuaciones diferenciales hiperbólicas (Thorpe & Whitaker 1992). En la literatura científica se encuentran diversos modelos matemáticos de la transferencia de calor y masa que ocurre en almacenes con lotes de granos (Patiño-Palacios 1996) y en materiales expuestos a secado solar (Abdel-Rehim & Nagib 2007). Tales modelos se emplean, generalmente, con fines de investigación para el diseño de los procesos de secado convencional y solar (Jiménez 1999; Ferreira & Costa 2009; Sandoval-Torres 2009; Retirado 2012).

El secado solar natural es el proceso en el cual los materiales se exponen directamente a la radiación solar, colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos (Montero 2005). Su implementación constituye una tecnología de bajo costo económico y ambiental que se emplea mundialmente (Retirado *et al.* 2012a).

En Cuba, el referido proceso se ha implementado como alternativa para racionalizar la producción de níquel y cobalto en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa (Estenoz 2009; Retirado 2009). Su puesta en práctica se ha basado en la experiencia teórico-práctica de los obreros y los estudios empíricos realizados en las industrias niquelíferas. Sin embargo, no considera la evaluación rigurosa de los fenómenos de transporte de calor y masa que caracterizan al secado natural, la cual debe incluir el análisis de los parámetros climatológicos existentes en el patio de secado y las exigencias tecnológicas que impone, para el procesamiento de la materia prima mineral, la Unidad Básica de Producción Secaderos.

De acuerdo con Retirado *et al.* (2011), las investigaciones relacionadas con el secado natural de la mena laterítica se han enfocado hacia los

criterios tecnológicos que influyen en la eficiencia y homogenización durante el secado (Estenoz *et al.* 2007a, 2007b; Estenoz 2009) y al estudio de la desorción de la humedad, en función de las variables que intervienen en el proceso (Retirado *et al.* 2009, 2012a, 2012b). Sin embargo, los mencionados trabajos no contienen los modelos satisfactorios para el cálculo y la simulación de la velocidad de secado durante el proceso.

En el presente trabajo se desarrolla la modelación matemática y simulación numérica de la velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie en la referida empresa productora de níquel y cobalto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Método de modelación matemática

Se partió de un balance de energía en la superficie de secado de la pila de lateritas; para ello se emplearon simultáneamente las ecuaciones de la transferencia de calor y masa. Lo anterior permitió la obtención de modelos físico-matemáticos de la velocidad de secado para pilas de minerales almacenadas a la intemperie y las ecuaciones de enlace que permiten la implementación práctica de los modelos. Este método de modelación de fenómenos de transporte ha sido empleado con efectividad en otras investigaciones relacionadas con proceso de secado solar (Abdel-Rehim & Nagib 2007; Retirado 2012).

Las condiciones de simulación y la aplicación informática empleadas son semejantes a las descritas en los trabajos que preceden a esta investigación (Retirado *et al.* 2012a, 2014).

3. MODELOS MATEMÁTICOS

3.1. Velocidad de secado en pilas de mena laterítica

En la Figura 1 se muestra un esquema estructural del secado natural de la mena laterítica almacenada en pilas a la intemperie; en la misma se reflejan los calores que influyen en el proceso.

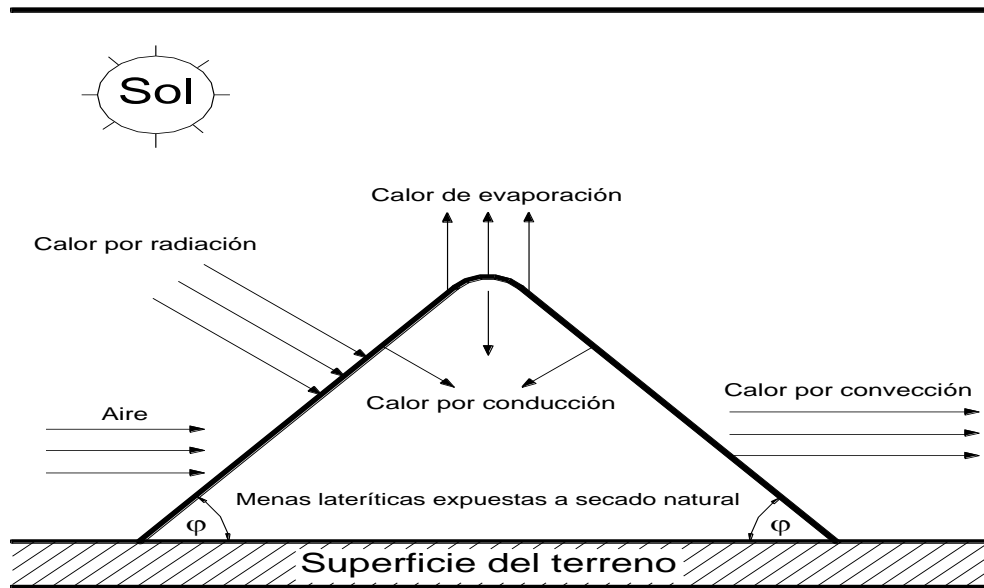


Figura 1. Calores que influyen en el secado natural de las lateritas.

Del análisis de la figura anterior se establece la ecuación 1. La misma relaciona el régimen de flujo calórico (el calor total) y el régimen de secado (N) durante el secado solar natural.

$$\left[\alpha_c \cdot \sigma \cdot (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + \right] \pm \frac{Nu \cdot k_a}{L} \cdot [T_s(\tau) - T_a] - k \cdot \frac{T_s(\tau) - T(\xi, \tau)}{\xi} = N \cdot \lambda \quad (1)$$

Donde:

α_c : absortividad del cielo, adimensional;

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

T_a : temperatura del aire, K;

α_s : absortividad solar de las lateritas, adimensional;

ρ : reflectividad de las lateritas, 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;

h : número de horas en que la pila recibe radiación solar ($6 \leq h \leq 18$), adimensional;

Nu : número de Nusselt, adimensional;

k_a : conductividad térmica del aire, W/m·K;

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

$T_s(\tau)$: temperatura en la superficie de la pila de minerales en el instante τ (para $y = l$), °C;

k : conductividad térmica de la mena laterítica, W/m·°C;

$T(\xi, \tau)$: temperatura en el interior de la pila a la distancia ξ y en el instante τ , °C;

ξ : espesor de la capa de material donde se produce la conducción del calor ($\xi = y - l$), m;

N : régimen de secado, kg/m²·s;

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

Las expresiones particulares para la determinación de los calores presentes en el miembro izquierdo de la expresión 1 se obtienen del análisis de los modos de transferencia de calor que influyen en el secado natural de la mena laterítica (Retirado *et al.* 2011).

Para calcular la radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila de mena laterítica, la cual está inclinada y orientada en φ y ψ grados [$I(\varphi, \psi)$], se emplea la expresión 2 (Montero 2005):

$$I(\varphi, \psi)_h = \sum_{h=6}^{18} I_H \cdot \left[(1 - C_e) \cdot R(\varphi, \psi)_h + C_e \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \cdot \eta \right] \quad (2)$$

Siendo:

$$R(\varphi, \psi)_h = \frac{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a - \varphi) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a - \varphi) \cdot \cos(w_h)}{\text{sen}(\delta_s) \cdot \text{sen}(l_a) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(l_a) \cdot \cos(w_h)} \quad (3)$$

Donde:

I_H : radiación incidente sobre la superficie horizontal, W/m²;

C_e : coeficiente empírico, adimensional;

$R(\varphi, \psi)_h$: factor de conversión, adimensional;

η : albedo o reflectividad del suelo frente al plano receptor, habitualmente oscila entre 0,17 y 0,2 (Montero 2005);

δ_s : declinación solar, grados sexagesimales;

l_a : latitud, grados sexagesimales;

w_h : ángulo horario, grados sexagesimales.

Debido a que el secado solar de la mena laterítica se desarrolla a la intemperie, el material intercambia calor con el aire en condiciones naturales. En estas circunstancias la transmisión de calor se produce por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.* 2011). Para calcular el número de Nusselt (Nu), según el tipo de convección predominante (Nu_L , Nu_F , y Nu_M), se emplean las expresiones 4, 5 y 6 propuestas por Tiwari & Sarkar (2006), Kasatkin (1987) e Incropera & De Witt (2003), respectivamente.

$$Nu_L = 0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} = 0,56 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

$$Nu_F = 2 + 0,025 \cdot Re^{\frac{9}{10}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gu^{\frac{2}{15}} \quad (5)$$

$$Nu_M = \left\{ \left[2 + 0,025 \cdot Re^{\frac{9}{10}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gu^{\frac{2}{15}} \right]^3 \pm \left[0,56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \right]^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Donde:

Nu_L , Nu_F , Nu_M : números de Nusselt respectivos para la convección libre, forzada y mixta, adimensionales;

Gr , Pr , Ra , Re y Gu : números de Grashof, Prandtl, Rayleigh Reynolds y Gujman, adimensionales.

La temperatura del material en la superficie de la pila en cualquier instante τ [$T_s(\tau)$] se calcula como una función de dos parámetros fundamentales: la radiación solar global y el calor transmitido por convección, dependiendo el primero de la inclinación de la superficie, el ángulo de incidencia y la altura solar, y el segundo del coeficiente de transferencia de calor por convección y la diferencia de temperatura entre la superficie y la corriente libre, factores todos que se encuentran en la expresión 7 (Incropera & De Witt 2003).

Para resolver la referida ecuación se recomienda utilizar algún software apropiado (Derive, MATLAB, Mathcad Professional o cualquier otro). En el presente trabajo se determinó el parámetro $T_s(\tau)$ con la aplicación informática SecSolar.exe (Retirado 2012).

$$\varepsilon \cdot \sigma [T_s(\tau)]^4 + h_a \cdot T_s(\tau) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^4 - h_a \cdot T_a - \left\{ \alpha_c \cdot \sigma (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + (\alpha_s - \vartheta) \cdot I(\varphi, \psi)_h \right\} = 0 \quad (7)$$

Donde:

ε : emisividad del material, adimensional;

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

La distribución de temperatura del material en la pila de mena laterítica expuesta a secado natural se determina por la ecuación 8. Este modelo tiene como elemento novedoso que es el resultado de la solución de un problema de contorno específico que incluye las condiciones iniciales y de frontera características del proceso de secado natural objeto de investigación (Retirado *et al.* 2014).

$$T(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\cos(n\pi)}{n\pi} e^{\alpha \left(\frac{-n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \cdot \left[\int_0^{\tau} e^{\alpha \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot \frac{dT_s(\theta)}{d\tau} d\theta + T_s(0) - T_0 \right] \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + \left\{ T_0 + \frac{y}{l} [T_s(\tau) - T_0] \right\} \quad (8)$$

Donde:

α : difusividad térmica de la mena laterítica, m^2/s ;

T_0 : temperatura inicial del material, $^{\circ}C$.

El régimen de secado (N) se determina por las ecuaciones 9 o 11, según el periodo de secado del que se trate (Retirado 2012).

$$N = N_c = -\frac{m_s}{A} \left(\frac{dH}{d\tau} \right) \quad [\text{para el primer periodo de secado}] \quad (9)$$

Siendo:

$$m_s = \frac{m_0 \cdot (100 - H_0)}{100} \quad (10)$$

$$N = N_D = \frac{N_c \cdot [H(\tau) - H_e]}{H_c - H_e} \quad [\text{para el segundo periodo de secado}] \quad (11)$$

Donde:

N_c : régimen de secado en el periodo de velocidad constante, $kg/m^2 \cdot s$;

m_s : masa de la materia seca en el producto, kg ;

A : área donde se lleva a cabo la evaporación (área de exposición para el proceso investigado), m^2 ;

$dH/d\tau$: velocidad de secado, kg/kg·s;

dH : variación de humedad, kg/kg;

τ : tiempo de secado, s;

m_0 : masa inicial de material sin secar, kg;

H_0 : humedad inicial del material, kg/kg;

N_D : régimen de secado en el periodo de velocidad decreciente, kg/m²·s;

$H(\tau)$: humedad del material en cada instante de tiempo τ , kg/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.

El calor latente de vaporización en el agua libre, a presión constante, depende exclusivamente de la temperatura. Su valor en función de este parámetro se determina por la ecuación 12 (Montero 2005).

$$\lambda = \frac{R}{M_{ag}} \cdot [C_{S1} - C_{S2} \cdot (T_{ag} + 273,15)] \quad (12)$$

Donde:

R : constante de los gases (8 314), J/kmol·K;

M_{ag} : peso molecular del agua (18,01), kg/kmol;

C_{S1} y C_{S2} : constantes experimentales [cuyos valores son 6 547,1 y 4,23 (Giner & Gely 2005)], adimensionales;

T_{ag} : temperatura del agua, °C.

Al sustituir las expresiones de cálculo de N , m_s y λ en la ecuación 1 se obtiene para el periodo de velocidad de secado constante:

$$\left[\alpha_c \cdot \sigma \cdot (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + \right] \pm \frac{Nu \cdot k_a}{L} \cdot [T_s(\tau) - T_a] - k \cdot \frac{T_s(\tau) - T(\xi, \tau)}{\xi} =$$

$$= - \frac{dH}{d\tau} \cdot \frac{1}{A} \left[\frac{m_0 \cdot (100 - H_0)}{100} \right] \cdot \frac{R}{M_{ag}} \cdot [C_{S1} - C_{S2} \cdot (T_{ag} + 273,15)] \quad (13)$$

Después de las transformaciones correspondientes se despeja el término de interés y se obtiene la expresión 14. Esta permite el cálculo de la humedad del material en la superficie de la pila en cualquier instante de tiempo τ [$H_s(\tau)$].

$$H_s(\tau) = H_0 - \frac{A \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[\alpha_c \cdot \sigma \cdot (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + \right. \\ \left. + (\alpha_s - \vartheta) \cdot I(\varphi, \psi)_h \right] \pm \frac{Nu \cdot k_a}{L} \cdot [T_s(\tau) - T_a] - \\ \left. - k \cdot \frac{T_s(\tau) - T(\xi, \tau)}{\xi} \right\} \cdot \tau}{\left[\frac{m_0 \cdot (100 - H_0)}{100} \right] \cdot \frac{R}{M_{ag}} \cdot [C_{s1} - C_{s2} \cdot (T_{ag} + 273,15)]} \quad (14)$$

Donde:

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

La expresión 14 solo es aplicable al periodo de velocidad de secado constante. En el periodo de velocidad de secado decreciente se combinan las ecuaciones 1, 9, 10, 11 y 12, y se obtiene la expresión 15, la cual es análoga a la 14.

$$H_s(\tau) = H_0 - \frac{A \cdot [H(\tau) - H_e] \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[\alpha_c \cdot \sigma \cdot (0,0552 \cdot T_a^{1,5})^4 + \right. \\ \left. + (\alpha_s - \vartheta) \cdot I(\varphi, \psi)_h \right] \pm \frac{Nu \cdot k_a}{L} \cdot [T_s(\tau) - T_a] - \\ \left. - k \cdot \frac{T_s(\tau) - T(\xi, \tau)}{\xi} \right\} \cdot \tau}{(H_c - H_e) \cdot \left[\frac{m_0 \cdot (100 - H_0)}{100} \right] \cdot \frac{R}{M_{ag}} \cdot [C_{s1} - C_{s2} \cdot (T_{ag} + 273,15)]} \quad (15)$$

Luego, mediante la ecuación 16, se calcula la distribución de humedad del material [$H(y, \tau)$] en una pila de mena laterítica expuesta a secado natural (Retirado *et al.* 2012b). Nótese que esta expresión depende del término $H_s(\tau)$, el cual se calcula según el periodo de secado que predomine (ecuaciones 14 y 15).

$$H(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \tau} \left[\cos(n\pi) \left(A^* + \frac{2H_s(0)}{n\pi} \right) + B^* \right] \right\} \cdot \text{sen} \left(\frac{n\pi}{l} y \right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \quad (16)$$

Siendo:

$$A^* = \frac{2 \cdot \int_0^{\tau} e^{k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \theta} R_n(\theta) \cdot d\theta - 2 \cdot [H_1 - H_s(0)]}{n\pi} \quad (17)$$

$$B^* = \frac{2 \cdot [H_0 - H_s(0)] \cdot \text{sen}(n\pi)}{n^2 \pi^2} + \frac{2 \cdot \left[n\pi \int_0^l H_1(y) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy - H_0 \cdot l \right]}{n\pi \cdot l} \quad (18)$$

Donde:

k_u : coeficiente de conducción de humedad, m²/s.

Finalmente, la velocidad de secado en una pila de minerales almacenada a la intemperie se calcula mediante la expresión 19. Para ello se determina, mediante las ecuaciones 14-16, la humedad del material en los instantes de tiempo τ y $\tau+d\tau$ y se divide entre el intervalo de tiempo transcurrido ($d\tau$).

$$-\frac{dH}{d\tau} = \frac{H(y, \tau + d\tau) - H(y, \tau)}{d\tau} \quad (19)$$

Donde:

$H(y, \tau+d\tau)$: humedad del material calculada en el instante de tiempo $\tau+d\tau$, kg/kg;

$H(y, \tau)$: humedad del material calculada en el instante de tiempo τ , kg/kg.

La expresión 19, combinada con la 16, 15, 14 y las restantes ecuaciones de enlace (2-12), permite calcular la velocidad de secado en la pila de minerales. El mismo tiene como elemento novedoso que es aplicable a los dos periodos de secado y que está particularizado a las condiciones específicas en que se implementa el secado natural en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

4. SIMULACIONES NUMÉRICAS

La velocidad de secado durante el proceso tiene un comportamiento oscilatorio que se corresponde con las fluctuaciones que experimenta la radiación solar (Retirado *et al.* 2012a), y con la distribución de humedad y temperatura del material en la pila (Retirado *et al.* 2012b, 2014). Se caracteriza, además, por tener pequeños valores (Figuras 2 y 3), los cuales son consecuencia de la baja densidad de energía térmica disponible para el secado natural.

En la Figura 2 se observa que la velocidad de secado en el talud este de la pila, entre las 6:30 y las 8 horas, es prácticamente insignificante debido a la poca radiación solar existente, pero se intensifica considerablemente entre las 10 y las 13:30 horas, como resultado del incremento de la radiación y la temperatura del material en la superficie de secado. Sin embargo, posterior a las 14 horas y hasta las 18, la velocidad de secado es nula porque en el talud analizado deja de incidir la radiación solar, debido al efecto de sombra que se produce como resultado de la combinación del movimiento diario del sol y la inclinación de la superficie de secado de la pila.

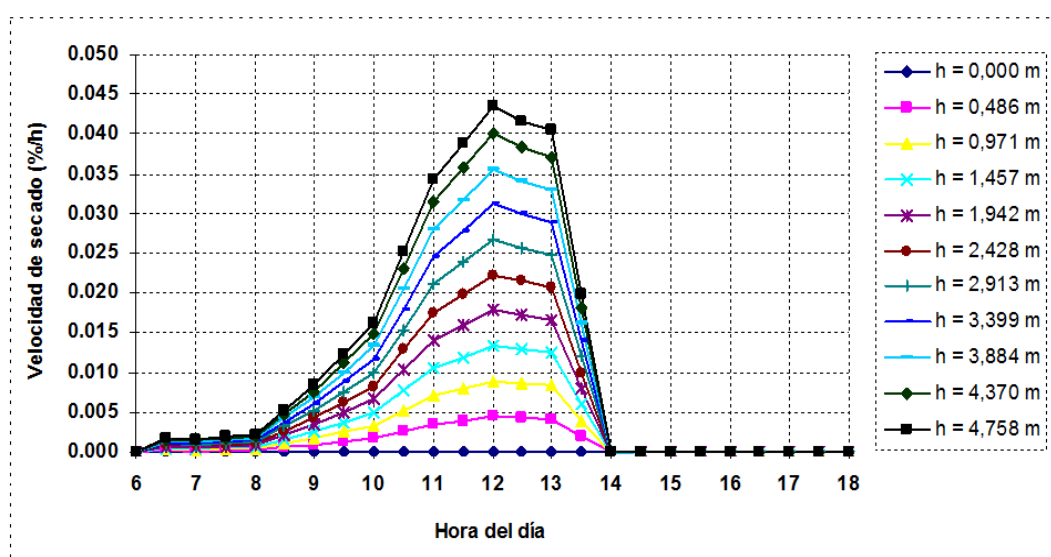


Figura 2. Simulación de la velocidad de secado en el talud este de la pila, desde la superficie de secado hasta la base.

En el caso del talud oeste de la pila (Figura 3) se puede inferir que hasta las 10 horas el mismo se encuentra a la sombra. Sin embargo, a partir de esa hora comienza a incidir la radiación solar y, por consiguiente, se incrementa abruptamente la velocidad de secado alcanzando sus valores máximos entre las 11 y las 15 horas; pero a diferencia del talud este (Figura 2), aquí entre las 14 y las 18 horas, la velocidad de secado tiene valores apreciables para el proceso investigado (Figura 3). Lo anterior está condicionado por los regímenes de radiación solar que inciden en la superficie de secado de la pila en la sección de la tarde, los cuales se deben a la asimetría que presenta este parámetro, respecto al mediodía solar, para la región de Moa.

De los comportamientos mostrados en las Figuras 2 y 3 se infiere que la implementación práctica del proceso debe realizarse con pilas de geometría asimétrica cuyo talud oeste sea mucho mayor que el talud este. De esta manera se reduce la inclinación del talud oeste y los

espesores de secado. Además, se hace corresponder la mayor superficie de captación solar de la pila con el horario en que más radiación solar incide, lo que provoca un incremento de la velocidad de secado y la disminución del tiempo de exposición del material en el patio de secado.

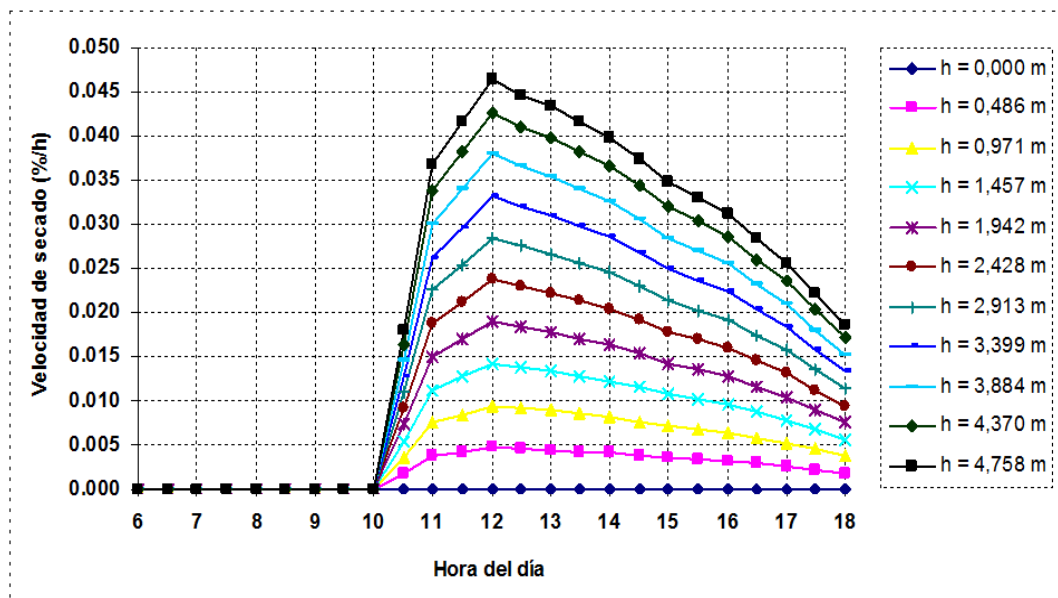


Figura 3. Simulación de la velocidad de secado en el talud oeste de la pila, desde la superficie de secado hasta la base.

Los resultados obtenidos para la velocidad de secado son congruentes con los alcanzados en las simulaciones computacionales de la distribución de temperatura y humedad que se desarrollaron para la pila de mena laterítica del caso de estudio analizado (Figuras 4 y 5).

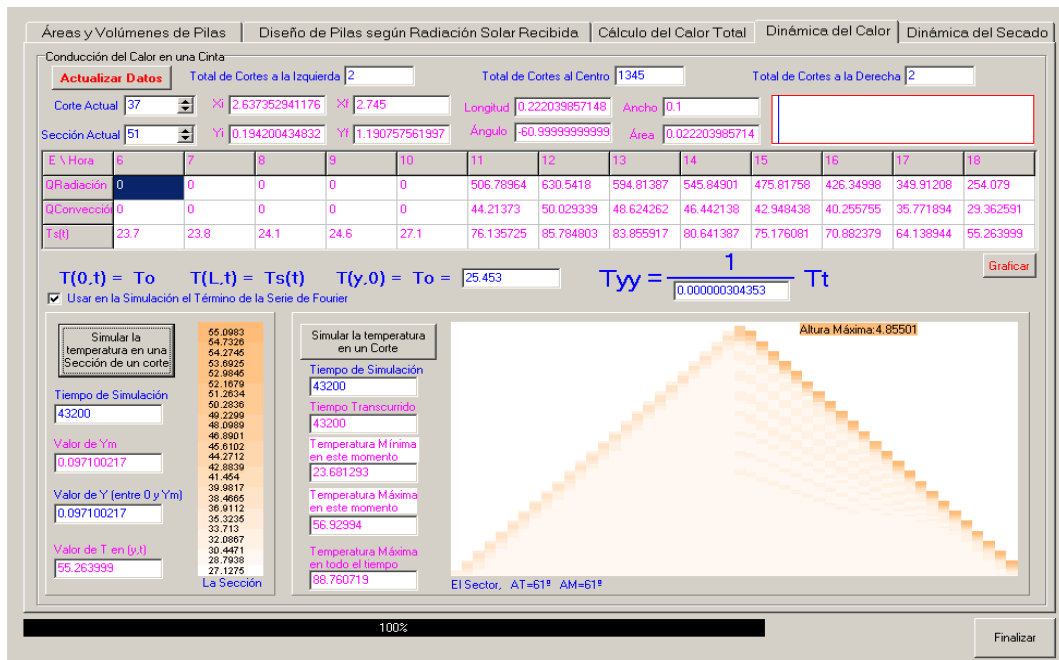


Figura 4. Simulación de la distribución de temperatura en ambos taludes de la pila, desde la superficie hasta la base.

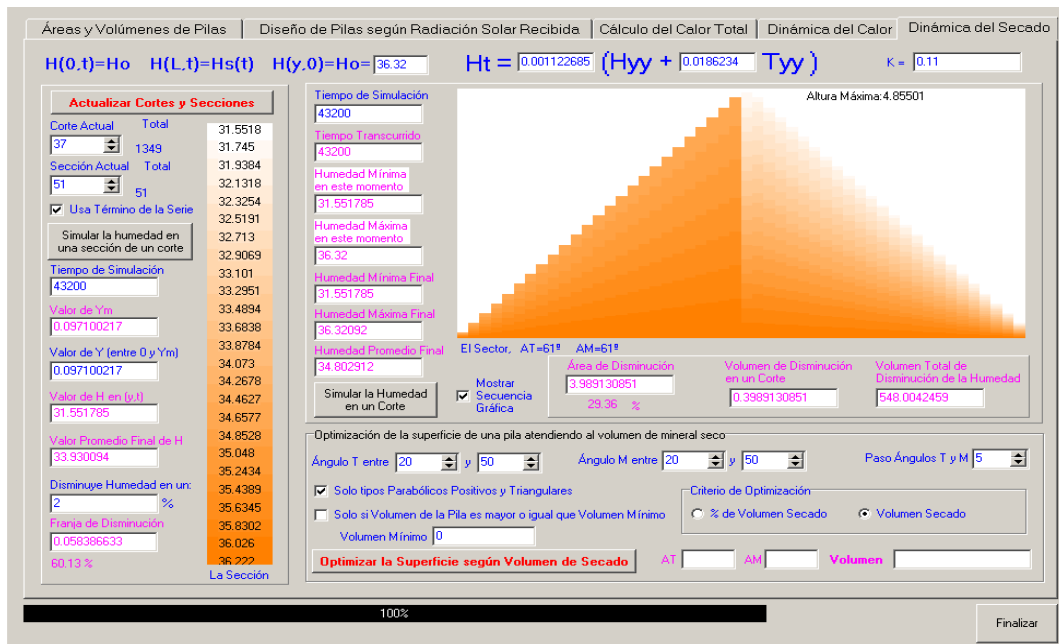


Figura 5. Simulación de la distribución de humedad en ambos taludes de la pila, desde la superficie hasta la base.

En las Figuras 4 y 5 los valores respectivos de temperatura del material y la reducción de humedad en el mismo son mayores en las capas superficiales, por estar estas en contacto directo con la radiación solar. Por tanto, el material en esta zona se encuentra más caliente y tiene menos contenido de humedad que en el interior de la pila. Lo anterior se refleja, en las simulaciones numéricas, mediante el cambio en la

intensidad del color. También es obvia la diferencia entre los resultados obtenidos en los dos taludes de la pila, los cuales pueden ser atribuibles a la asimetría que presenta la radiación solar y los efectos de sombra, aspectos ya explicados.

5. CONCLUSIONES

La ecuación 19, integrada con las expresiones 16, 15 y 14, constituye el modelo matemático que permite calcular la velocidad de secado, en ambos periodos, para las pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie. El mismo relaciona los regímenes de flujo calórico y de secado durante el proceso. Se deduce del balance de energía térmica en la superficie de secado de una pila que está expuesta, de forma natural, a la radiación solar y a la convección del aire.

La velocidad de secado en la pila de mena laterítica, de acuerdo con las simulaciones numéricas, no alcanzó el 0,05 %/h; tuvo un comportamiento oscilatorio y fue nula en determinados horarios de la mañana y la tarde en los taludes oeste y este de la pila, respectivamente. Lo anterior estuvo determinado por los bajos regímenes de energía térmica disponible para el secado natural, la asimetría que presenta la radiación solar, respecto al mediodía solar, en la región de Moa y el efecto de sombra que se produce por la combinación del movimiento diario del sol y la inclinación de la superficie de secado de la pila.

6. REFERENCIAS

- ABDEL-REHIM, Z. & NAGIB, Z. 2007: Solar drying of Bagasse Pulp. *Journal of Applied Sciences Research* 3(4): 300-306.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; REYES, A.; LOVAINA, Y. & PINTO, H. 2007a: Uso racional de los recursos con la explotación de los depósitos de estabilización de la calidad en la empresa Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; BATISTA, N.; DONATIÉN, A. & PÉREZ, N. 2007b: 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. 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.
- FERREIRA, S. & COSTA, A. 2009: Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica* 20(2): 89-104.

- GINER, S. & GELY, M. 2005: Sorptional Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies. *Biosystems Engineering* 92(2): 217-227.
- INCROPERA, F. & DE WITT, D. 2003: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 t. Pueblo y Educación, La Habana.
- JIMÉNEZ, H. 1999: *Modelamiento matemático de los procesos de transferencia de momentum, calor y masa en medios porosos*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana. 289 h.
- KASATKIN, A. 1987: *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. 2 t. Pueblo y Educación, La Habana.
- MONTERO, I. 2005: *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Tesis doctoral. Badajoz. 262 h. Consultado: 10 enero 2010. Disponible en: <http://www.unex.es/publicaciones>.
- PATIÑO-PALACIOS, G. 1996: *Modelamiento matemático de flujo convectivo en estado transitorio en medios porosos*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Celaya.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2014: Distribución de temperatura en pilas de mena laterítica expuestas a secado natural. *Minería y Geología* 30(1): 33-50. Consultado: 18 abril 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2012b: Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología* 28(4): 1-19. Consultado: 21 enero 2013. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E. & LAURENCIO, H. 2012a: Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel. *Minería y Geología* 28(2): 30-46. Consultado: 5 nov 2012. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E.; LAMORÚ, M. & LEYVA, B. 2011: Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* 27(1): 1-21. Consultado: 15 oct 2011. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & HERNÁNDEZ, N. 2009: Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería y Geología* 25(1): 1-11. Consultado: 16 dic 2011. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>.

- RETIRADO, Y. 2012: *Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 183 h.
- SANDOVAL-TORRES, S. 2009: Modelación matemática del secado convencional de madera. *Madera y Bosques* 15(1): 75-89.
- THORPE, G. & WHITAKER, S. 1992. Local mass and thermal equilibria in ventilated Grain Bulks. The development of heat and mass conservation equations (Part I). *Journal of Stored Products Research* 28(1): 15-27.
- TIWARI, G. & SARKAR, B. 2006: Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International* 8(16): 1-9.

Yoalbys Retirado-Mediaceja yretirado@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Aristides Alejandro Legrá-Lobaina alegra@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Matemática. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Marbelis Lamorú-Urgelles mlamoru@ismm.edu.cu

Profesora Asistente. Máster en Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Enrique Torres-Tamayo etorrest@ismm.edu.cu

Profesor Titular. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Héctor Luis Laurencio-Alfonso hlaurencio@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Ever Góngora-Leyva egongora@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.