

## Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel

Yoalbys Retirado-Mediaceja  
Arístides Alejandro Legrá-Lobaina  
Marbelis Lamorú-Urgellés  
Enrique Torres-Tamayo  
Héctor Luis Laurencio-Alfonso

### Resumen

En la industria niquelera cubana la mena laterítica se dispone en pilas para reducir su contenido de humedad mediante secado solar natural. En este artículo se desarrolla, mediante el método de Búsqueda Exhaustiva, la optimización multicriterial y energética de la geometría de la sección transversal de las pilas con el fin de obtener áreas de exposición de secado y volúmenes de mena suficientemente grandes que maximicen la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total en la superficie de las pilas. Los resultados evidenciaron que para el secado óptimo las pilas deben tener sección transversal parabólica y estar inclinadas, respecto al plano horizontal, entre 30 y 60 grados sexagesimales; el empleo de inclinaciones mayores de la superficie de secado incrementa los valores del área de exposición y del volumen de las pilas, pero reduce la captación de energía solar.

### Palabras clave

Menas lateríticas; optimización; pilas de menas; secado solar.

## **Optimization of lateritic solar drying in cuban nickel mining industries**

### **Abstract**

The ore feed in Cuban nickel industries is stored in piles for sun drying to reduce ore moisture content. This article presents multi-criteria and power optimization of the geometry of pile cross sections in order to obtain total exposed surface area to drying and ore volumes large enough to maximize solar radiation density, overall solar radiation and total heating of the pile surface. The results evidenced that, for optimum drying, ore piles are to have parabolic cross sections and be inclined at 30 to 60 sexagesimal degrees. Higher angles of drying surface area increase area coverage and the ore volume but reduce collection of solar energy.

### **Keywords**

Lateritic ore; optimization; ore pile; solar drying.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el secado natural la superficie de secado de los materiales está expuesta directamente a la radiación solar, al aire y a otras condiciones ambientales, siendo el sol la única fuente de energía utilizada (Ocampo 2006; Tiwari & Sarkar 2006; Ferreira & Costa 2009).

En las empresas cubanas productoras de níquel el secado natural se realiza disponiendo la mena en pilas a la intemperie como alternativa para racionalizar el proceso tecnológico de obtención de níquel. Se implementa sobre la base de la experiencia práctica, la intuición de los trabajadores e investigadores de la industria y de algunos estudios empírico-teóricos y experimentales (Estenoz 2001; Estenoz et al. 2005, 2007a y 2007b; Retirado 2007; Retirado et al. 2007, 2008, 2009, 2010; Estenoz 2009; Retirado et al. 2011; Vinardell 2011).

Las pilas lateríticas adoptan naturalmente una forma parabólica al ser vertidas por los camiones de volteo en el patio de secado, luego son reacomodadas hasta obtener formas triangulares, las que supuestamente favorecen la eficiencia del secado; sin embargo, no existen investigaciones que confirmen este supuesto. Se hace necesario entonces estudiar la influencia que ejerce la geometría de la sección transversal de la pila en la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total que incide en la superficie de secado.

Los modelos matemáticos que permiten calcular el área de exposición y el volumen de las pilas con sección transversal semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular han sido previamente publicados (Retirado & Legrá 2011). La posibilidad de que determinadas formas geométricas de las pilas garanticen áreas de exposición y volúmenes suficientemente grandes y que a la vez maximicen, para una superficie horizontal disponible, la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total que inciden en la superficie de secado de las pilas ha sido insuficientemente estudiada. Es por ello que el objetivo del presente artículo es encontrar, para pilas de mena laterítica, la geometría que propicie una mayor eficiencia del secado solar natural.

## 2. MÉTODOS

### 2.1. Elección del método de optimización

Se seleccionó el método utilizado por Sierra (2010), el cual básicamente consiste en:

1. Discretizar los valores de las variables.
2. Aplicar el método de Búsqueda Exhaustiva, el cual consiste en evaluar las restricciones para cada una de las combinaciones de los

valores discretos de las variables independientes. Cuando cierta combinación de valores de las variables satisface las restricciones se considera que se obtuvo una solución satisfactoria (Arzola 2000).

3. Evaluar la función objetivo para todas las soluciones factibles y seleccionar las mejores de acuerdo con las particularidades del proceso de secado natural y de los valores del parámetro que se desea optimizar.

La ventaja de este método es que no se presentan complicaciones relacionadas con la continuidad, aleatoriedad y derivabilidad de las funciones objetivo y las restricciones. Sus desventajas se relacionan con la correcta selección de la discretización, de manera que se contemple el análisis del mayor número de casos y se obtenga una solución satisfactoria en un tiempo razonable, para lo cual es imprescindible el uso de medios automatizados de cómputo.

## 2.2. Procedimiento de optimización

### 2.2.1. Discretización del problema de optimización

- ✦ Se divide la pila en un número  $n$  de cortes finos  $k_1, k_2, \dots, k_n$ ; al espesor de cada corte  $k_i$  se les denomina  $e_i$ . Cada uno de estos cortes  $k_i$  es dividido en  $m$  sectores  $C_{i1}, C_{i2}, C_{ij}, \dots, C_{in}$ , tal como se muestra de forma simplificada en la Figura 1.
- ✦ La superficie queda dividida en secciones superficiales  $S_{ij}$  determinadas por cada corte  $k_i$  y cada sector  $C_{ij}$ . A cada sección superficial  $S_{ij}$  se le puede asociar una sección plana  $P_{ij}$  determinada por los cuatro vértices de  $S_{ij}$ .
- ✦ A cada corte  $k_i$  se le asocia una función  $f(X_i)$  tal que, a cada valor de  $X$ , le corresponda un valor de  $Y$  en la superficie de la pila.

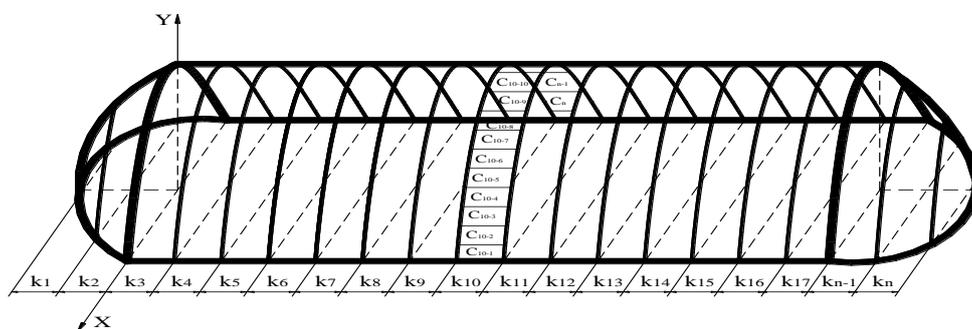


Figura 1. Representación de los cortes  $k_1, k_2, \dots, k_n$  y los sectores  $C_{10-1}, C_{10-2}, \dots, C_n$  que se forman al dividir la superficie de captación solar de la pila de minerales.

En la práctica, el ancho de la base de la pila en cada corte fue dividido en  $m$  subintervalos, donde se cumple la condición:  $3 \leq m \leq 100$ . Por defecto se tomó  $m = 50$ .

Esta partición de la base de la pila generó los subintervalos  $[X_j, X_{j+1}]$ , siendo  $j = 1, 2, \dots, m$ . Al evaluar para cada valor  $X_j$ ,  $X_{j+1}$  y  $X_m$  se obtienen los respectivos valores de  $Y_j$ ,  $Y_{j+1}$  y  $Y_m$ , siendo:

$$X_m = \frac{X_j + X_{j+1}}{2} \quad (1)$$

Seguidamente se determinan los parámetros  $\alpha_j$  y  $l_j$  mediante las expresiones 2 y 3, para ello se toma como referencia la Figura 2.

$$\alpha_j = \arctan\left(\frac{Y_{j+1} - Y_j}{X_{j+1} - X_j}\right) \quad (2)$$

$$l_j = \sqrt{(X_{j+1} - X_j)^2 + (Y_{j+1} - Y_j)^2} \quad (3)$$

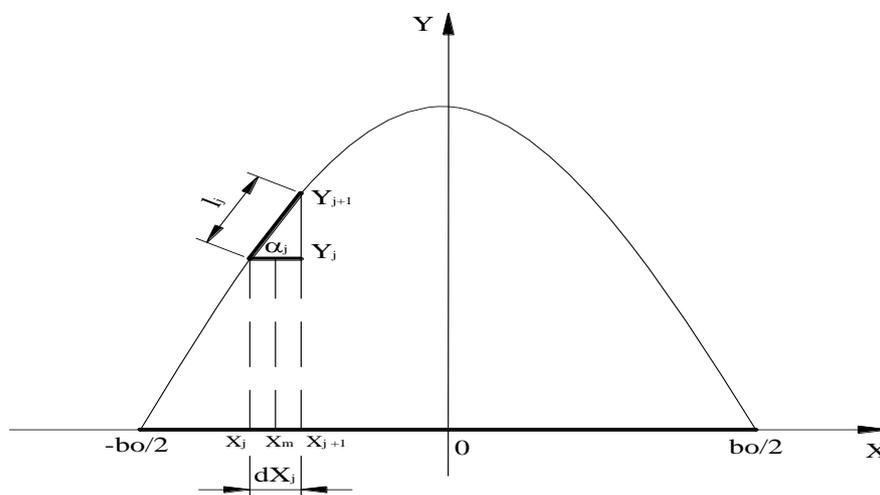


Figura 2. Esquema estructural para el cálculo de los parámetros  $\alpha_j$  y  $l_j$ .

El área de cada sección superficial  $S_{ij}$  ( $A_{ij}$ ) puede ser aproximada al área de la sección plana  $P_{ij}$ . Se calcula por la expresión 4.

$$A_{ij} = l_j \cdot e_i \quad (4)$$

Mediante las expresiones 5, 6 y 7 se determina la radiación solar global que recibe la superficie de la pila ( $I_{SG}$ ) en el horario comprendido entre las 6 y las 18 horas del día.

$$I_{SG} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (5)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^m I_{ij} \quad (6)$$

$$I_{ij} = \sum_{h=6}^{18} I_{ijh} \quad (7)$$

Donde:

$I_{SG}$ : radiación solar global que recibe la superficie de la pila de mena laterítica; J/día.

$n$ : número de cortes en que se divide la superficie de la pila; adimensional.

$I_i$ : radiación global que recibe el corte  $k_i$ ; J/día.

$m$ : número de sectores en que se divide cada uno de los cortes de la superficie; adimensional.

$I_{ij}$ : radiación global que recibe una sección plana  $P_{ij}$  determinada por el corte  $i$  y el sector  $j$ ; J/día.

$h$ : horas en que las secciones reciben radiación solar ( $6 \leq h \leq 18$ ); adimensional.

El término  $I_{ijh}$  se calcula por la expresión 8. Esta radiación es una aproximación razonable de la radiación que recibe la sección  $S_{ij}$ .

### 2.2.2. Aplicación del método Búsqueda Exhaustiva

- ✦ Se toman los valores mínimos prefijados para los ángulos maximal y tangencial de la pila de mena [ $\varphi_m = \varphi_{m(Minimo)}$  y  $\varphi_t = \varphi_{t(Minimo)}$ ]. Es obvio que la combinación de los valores de estos dos ángulos determina cierta configuración geométrica de las secciones  $P_{ij}$ .
- ✦ Se determina el valor de la radiación solar global ( $I_{SG}$ ) para los ángulos  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$  prefijados.
- ✦ Se inicia un doble lazo algorítmico donde se van incrementando los valores de  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$  hasta que los mismos alcanzan ciertos valores máximos prefijados [ $\varphi_m = \varphi_{m(Máximo)}$  y  $\varphi_t = \varphi_{t(Máximo)}$ ]. Para cada combinación de los ángulos  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$  se calcula  $I_{SG}$ .
- ✦ Entre todos los valores calculados de  $I_{SG}$  se selecciona el valor máximo [ $I_{SG(Máximo)}$ ]. La pareja de ángulos maximal y tangencial ( $\varphi_m$

y  $\varphi_t$ ) que lo generó determina la mejor forma geométrica de la sección transversal de la pila.

### 2.3. Modelos empleados en el proceso de optimización

#### 2.3.1. Radiación solar incidente

Si se conoce la radiación global sobre una superficie horizontal en sus dos componentes (directa y difusa), existen diversos métodos y modelos matemáticos para determinar la radiación global sobre una superficie inclinada (Corvalan 1995; Montero 2005; McQuiston *et al.* 2008).

La radiación solar global que incide sobre una superficie inclinada y orientada en  $\varphi$  y  $\theta$  grados, respectivamente  $[I(\varphi, \theta)]$  puede ser determinada mediante la ecuación 8.

$$I(\varphi, \theta)_h = \sum_{h=6}^{18} \left[ I_{Bh} \cdot R(\varphi, \theta)_h + I_{Dh} \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + I_h \cdot \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \cdot \eta \right] \quad (8)$$

Donde:

$I(\varphi, \theta)_h$ : radiación global sobre una superficie inclinada;  $J/m^2 \cdot \text{día}$ .

$I_{Bh}$  y  $I_{Dh}$ : radiación directa y radiación difusa;  $J/m^2 \cdot \text{día}$ .

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

$I_h$ : radiación incidente sobre la superficie horizontal;  $J/m^2 \cdot \text{día}$ .

$\varphi$ : inclinación de la superficie respecto al plano horizontal; grados sexagesimales.

$\theta$ : orientación de la superficie respecto al eje norte-sur; grados sexagesimales.

$\eta$ : reflectividad del suelo frente al plano receptor, oscila entre 0,17 y 0,2 para la tierra húmeda (Montero 2005); es adimensional.

En las pilas de menas lateríticas cubanas expuestas a secado natural la inclinación de la superficie de secado ( $\varphi$ ) se corresponde con los ángulos maximal y tangencial del material. Cuando se trata de los ángulos de reposo naturales estos pueden ser calculados por las ecuaciones 9 y 10, propuestas por Sierra (2010); en caso contrario se determinan aplicando trigonometría.

$$\varphi_m = 30,58 - 0,4592 \cdot G - 0,00496 \cdot G \cdot H + 0,00651 \cdot G^2 + 0,01109 \cdot H^2 \quad (9)$$

$$\varphi_t = 33,25 - 0,505 \cdot G - 0,0025 \cdot G \cdot H + 0,0062 \cdot G^2 + 0,008 \cdot H^2 \quad (10)$$

Donde:

$\varphi_m$  y  $\varphi_t$ : ángulo maximal y ángulo tangencial; grados sexagesimales.

$G$  y  $H$ : granulometría promedio y humedad promedio del material; mm y %, respectivamente.

### 2.3.2. Área de exposición y volumen de las pilas

La geometría de la sección transversal que adquiere la pila de mena laterítica, al ser depositada, depende de los ángulos maximal ( $\varphi_m$ ) y tangencial ( $\varphi_t$ ) del material. Según Ricaurte & Legrá (2010), la sección transversal de la pila puede ser semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular.

Los modelos generales que permiten calcular el área de exposición y el volumen de las pilas de mena laterítica, en función de la geometría de la sección transversal y las dimensiones básicas (largo y ancho) del área horizontal disponible, se relacionan a continuación:

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_o/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (11)$$

$$V = b_o^2 \cdot k_f \cdot L_{SL} + 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot f(x) dx \quad (12)$$

Donde:

A: área de exposición de la pila de minerales; m<sup>2</sup>.

$b_o$ : ancho de la base de la pila; m.

$L_{SL}$ : longitud de la superficie lateral de la pila; m.

$f(x)$ : función que caracteriza la generatriz de la superficie lateral; m.

V: volumen de la pila; m<sup>3</sup>.

$k_f$ : factor de forma que depende del tipo de geometría; adimensional.

## 3. ELEMENTOS PRÁCTICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN

La teoría que aquí se asume es que la radiación global que recibe la pila de mena está influenciada por el tamaño y por la forma del área de exposición; por tanto, se debe encontrar para un área horizontal de dimensiones conocidas, la forma geométrica de la sección transversal de la pila que garantice la máxima captación de la energía solar sobre la superficie de secado.

### 3.1. Orientación de las pilas expuestas a secado natural

Con frecuencia suele suponerse que las pilas con mayor área de exposición reciben mayor cantidad de radiación solar, pero hacer esta consideración presupone que la radiación solar captada por la superficie de secado solamente depende del tamaño de esta última. Sin embargo, se conoce que la captación de la radiación solar también depende de la forma, la inclinación y la orientación de la superficie de secado (Corvalan 1995; Montero 2005). Debe suponerse, además, cierta limitación en el tamaño de las áreas horizontales disponibles

para el secado, atendiendo a las dimensiones restringidas del patio de secado en las empresas.

Para la optimización desarrollada en este trabajo las pilas de mena laterítica se orientaron longitudinalmente en la dirección del eje norte-sur (Figura 3). De esta manera se logra una distribución uniforme de la radiación solar que incide sobre la superficie de secado de las pilas y se eliminan los inconvenientes asociados al cálculo de la radiación sobre una superficie inclinada y orientada arbitrariamente respecto al eje de referencia (Corvalan 1995; Montero 2005; McQuiston *et al.* 2008).

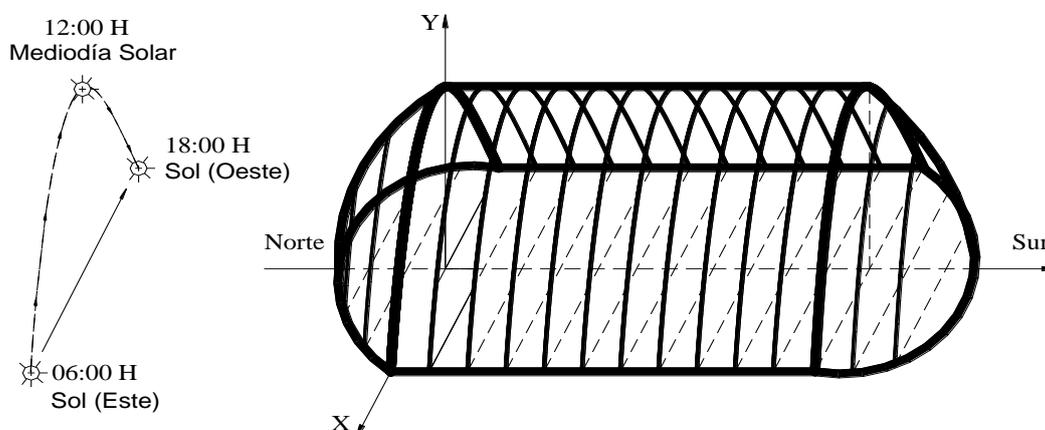


Figura 3. Orientación de las pilas de lateritas expuestas a secado solar.

### 3.2. Aplicación informática para los cálculos

El procedimiento de optimización y los modelos de cálculo establecidos para la radiación solar incidente, el área de exposición y el volumen de las pilas fueron implementados en una aplicación informática denominada "SecSolar", creada por un grupo multidisciplinario de investigadores del Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa y del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico. La aplicación informática permitió calcular la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total en la superficie de secado de las pilas.

### 3.3. Características de la pila seleccionada

- Masa de material expuesta a secado natural: 700 toneladas
- Longitud de la superficie lateral: 140 m
- Ancho de la base: 5,49 m
- Inclinación de la superficie de secado respecto al plano horizontal (ángulo maximal): 61 grados sexagesimales
- Forma geométrica de la sección transversal: triangular.

Las características antes expuestas coinciden con las de las pilas utilizadas en la implementación práctica del proceso de secado natural en las empresas cubanas productoras de níquel (Estenoz *et al.* 2007a y 2007b; Estenoz 2009; Vinardell 2011).

#### **4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

##### **4.1. Densidad de radiación solar recibida en la superficie**

Cuando se utiliza como función objetivo la densidad de radiación solar recibida en la superficie de secado de las pilas, los resultados reflejan un comportamiento oscilatorio con tendencia decreciente para los valores correspondientes a los diferentes ángulos calculados. Sin embargo, cuando se fija el valor del ángulo tangencial y se varía el ángulo maximal (en lo adelante denominados AT y AM, respectivamente) ocurre un decrecimiento para todas las combinaciones analizadas, observándose que para un mismo ángulo tangencial se obtiene mayor densidad de radiación en las pilas de sección transversal parabólica (combinación donde  $AT > AM$ ). Los valores máximo y mínimo de densidad de radiación solar se obtienen para las combinaciones de los ángulos maximal y tangencial  $25-20^\circ$  y  $70-70^\circ$ , lo que es lógico debido a la marcada incidencia que tiene el ángulo de inclinación de la superficie ( $\varphi$ ) en la función objetivo que se empleó para el cálculo (ver ecuaciones 5, 6, 7 y 8).

Este análisis puntual de las soluciones que generan los valores máximo y mínimo, basado en el enfoque clásico, si bien es cierto que puede conducir, desde el punto de vista teórico, a la optimización de la geometría de la sección transversal de la pila, en la práctica es poco factible porque durante los procesos de apilado y remoción del material se hace difícil mantener un valor fijo de la inclinación de la superficie. Por tanto, para el proceso investigado debe considerarse la posibilidad que brinda el enfoque flexible de optimización, que consiste en encontrar un conjunto de soluciones que satisfagan las restricciones de la función objetivo y que en la implementación práctica del proceso pueda materializarse sin grandes dificultades.

Los resultados se graficaron con el propósito de encontrar la región de soluciones satisfactorias. Como se aprecia en la Figura 4, pueden obtenerse valores de densidad de radiación suficientemente grandes para oscilaciones de los ángulos maximal y tangencial entre  $20-29,78^\circ$  y  $20-48,95^\circ$ . Para que la implementación del proceso investigado se ajuste más a la realidad física en que se desarrolla se aplicó el enfoque flexible de optimización recomendado en la literatura (Castro 2000; Simate 2003; Smout 2003; Hossain *et al.* 2005; Fayett 2008; Legrá y Silva 2011).

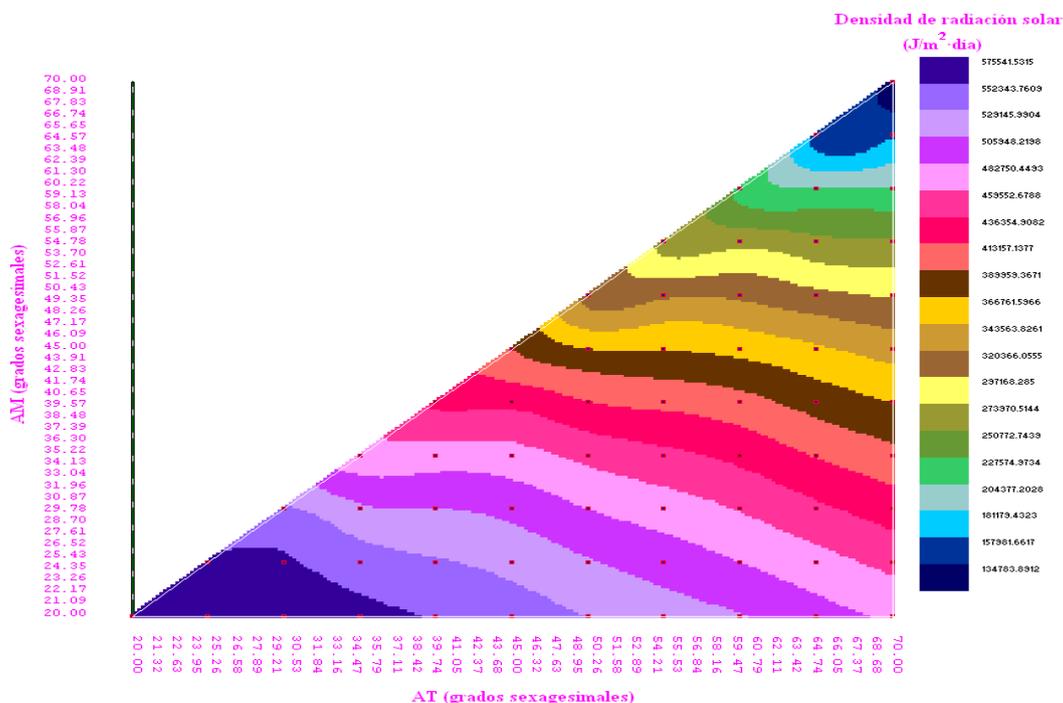


Figura 4. Comportamiento de la densidad de radiación solar recibida por la superficie de secado de la pila de menas lateríticas. Se emplea AT y AM en lugar de  $\varphi_t$  y  $\varphi_m$  para facilitar la realización de los gráficos.

#### 4.2. Radiación solar total y calor total en la superficie

Al considerar como función objetivo la radiación solar total los resultados muestran un comportamiento similar al caso de estudio anteriormente analizado. El valor máximo de radiación total se obtiene en la combinación de los ángulos maximal y tangencial 30-30° lo que indica que puede exponerse al secado natural una pila de mayor volumen respecto a la obtenida en la optimización descrita en el epígrafe anterior. Por su parte, el valor mínimo igualmente se obtiene en la combinación 70-70°.

En la Figura 5 se observa una región de valores satisfactorios de radiación solar total sobre la superficie de la pila cuando los ángulos maximal y tangencial oscilan entre 20-31,96° y 20-45,66°, respectivamente. De lo anterior se infiere que en los dos casos de estudio analizados las mejores soluciones de optimización se obtienen para combinaciones de ángulos inferiores a 50-50°. Por tanto, una recomendación práctica para la implementación del proceso es que las pilas deben construirse alargadas longitudinalmente, pero de poca

altura para propiciar que el espesor de secado sea pequeño y la captación de energía solar, grande.

Al valorar los resultados para el calor total en la superficie se obtiene un comportamiento similar al de la radiación solar total recibida (Figuras 5 y 6), coincidiendo que los valores máximo y mínimo se obtienen en las combinaciones 30°-30° y 70°-70°. Sin embargo, la región de soluciones factibles se obtiene cuando los ángulos maximal y tangencial oscilan entre 20°-31,96° y 20°-59,47°, respectivamente.

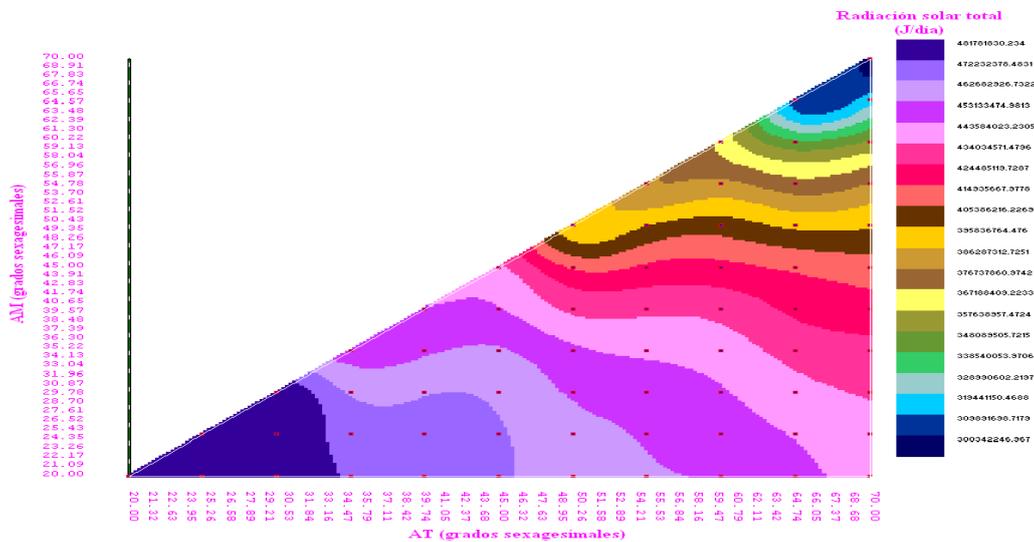


Figura 5. Comportamiento de la radiación solar total recibida por la superficie de secado de la pila.

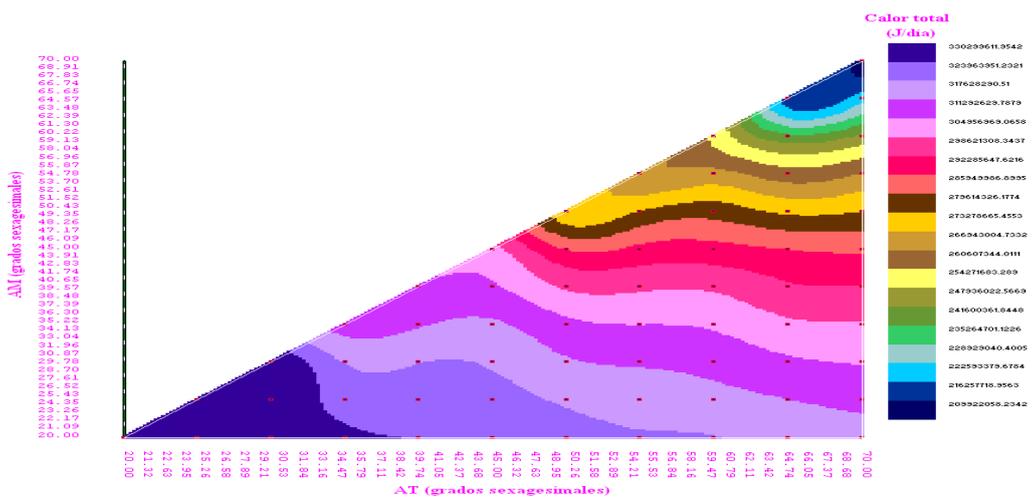


Figura 6. Comportamiento del calor total recibido por la superficie de secado de la pila.

La similitud entre los dos casos analizados se debe a la marcada incidencia que tiene la radiación solar en el flujo de calor total recibido por la superficie. En este punto debe recordarse que el calor total es la suma o la diferencia entre el calor por radiación y el calor por convección y que el segundo es poco influyente para las condiciones del secado natural existentes en las empresas cubanas productoras de níquel.

### 4.3. Influencia del área de exposición y volumen de las pilas

Los comportamientos mostrados en las Figuras 7 y 8 indican que el área de exposición y el volumen de las pilas aumentan en la medida en que se incrementan los ángulos maximal y tangencial. Las tendencias crecientes de las curvas en ambos casos son similares, pero la diferencia entre los valores máximo y mínimo es más acentuada en el caso del volumen ( $1\ 942,6\ m^3$  por  $1\ 014,3\ m^2$ ). De lo anterior se infiere que al variar los ángulos se pueden obtener incrementos en el volumen de las pilas superiores al incremento que se obtiene para el área de exposición.

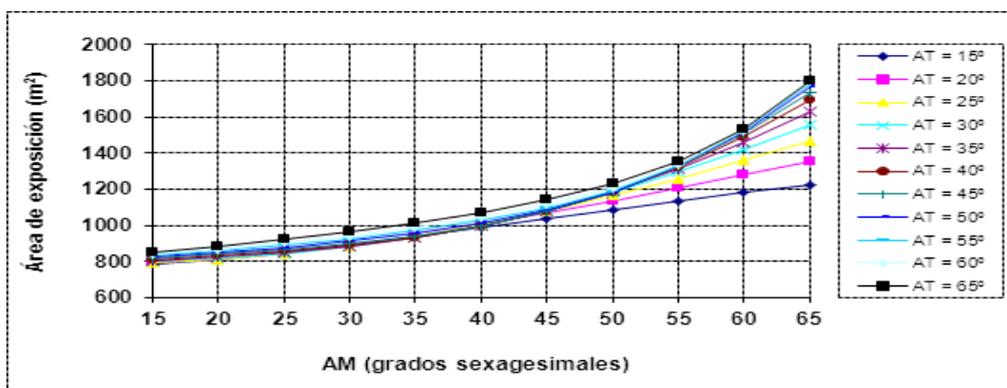


Figura 7. Comportamiento del área de exposición de la pila.

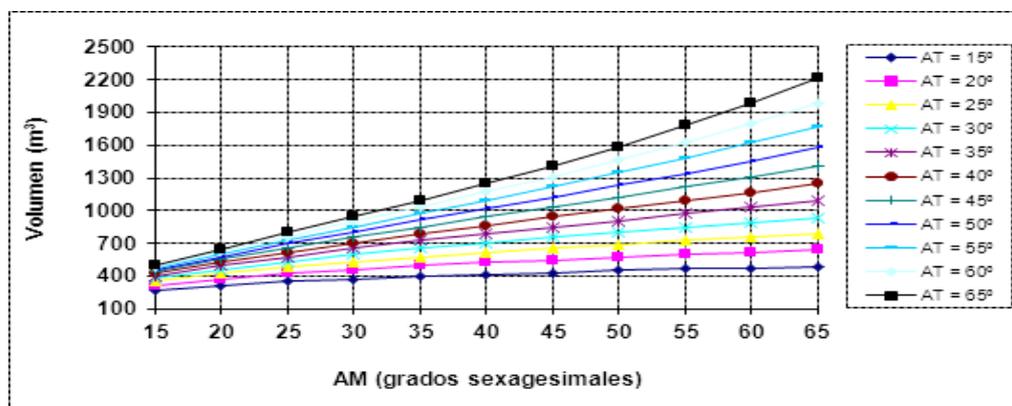


Figura 8. Comportamiento del volumen de la pila.

Por tanto, desde el punto de vista de la optimización del proceso de secado natural, deben considerarse no solo los valores cuantitativos del área de exposición, sino también la geometría de la sección transversal de la pila, porque de ella depende en buena medida el volumen de material que puede exponerse al secado natural en una superficie horizontal limitada y la cantidad de radiación solar que puede ser captada por la superficie de secado de la pila.

En el caso particular del volumen, la optimización de la sección transversal de la pila debe realizarse estableciendo un compromiso entre la productividad que demanda el proceso productivo y la reducción que se quiere obtener en el contenido de humedad del material. Si se desea secar mayor cantidad de material, entonces los niveles de reducción del contenido de humedad serían pequeños y si, por el contrario, se desea secar más el material, debe reducirse el volumen de las pilas.

Tal compromiso durante la implementación práctica del secado natural está concebido en la aplicación informática creada para este propósito, pero esencialmente obedece a la lógica, la intuición y la experiencia de los trabajadores e investigadores encargados de implementar el proceso en las empresas cubanas productoras de níquel y a las exigencias tecnológicas del proceso productivo.

Cuando se incrementó de veinte a sesenta grados sexagesimales la inclinación de la superficie de secado de la pila, los valores del área de exposición y del volumen de la misma aumentaron en  $713,2 \text{ m}^2$  y  $1\,416,2 \text{ m}^3$ . Sin embargo, la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total que inciden sobre dicha superficie se redujeron en  $353\,417,9 \text{ J/m}^2\cdot\text{día}$ ;  $111\,785\,643,8 \text{ J/día}$  y  $73\,455\,660,2 \text{ J/día}$ , respectivamente.

## 5. CONCLUSIONES

El método de optimización empleado posibilitó la discretización de los valores de las variables, la evaluación exhaustiva de las restricciones para cada uno de los valores discretos de las mismas, la evaluación de la función objetivo para todas las soluciones factibles y la selección de las mejores soluciones. Este enfoque permitió la optimización multicriterial de la geometría de la sección transversal de las pilas de menas lateríticas y evidenció que pueden obtenerse valores máximos y mínimos puntuales para la densidad de radiación solar, la radiación solar total y el calor total que inciden en la superficie de secado, sin embargo, debido a las características del material y del proceso

productivo, la implementación práctica del secado natural debe desarrollarse con pilas de sección transversal parabólica que tengan la superficie de secado inclinada entre 30 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal.

Para realizar el secado solar natural en las empresas cubanas productoras de níquel debe tomarse en consideración la interrelación existente entre la productividad que demanda el proceso productivo y la reducción que se desea obtener en el contenido de humedad de la mena durante el secado.

## 6. REFERENCIAS

- ARZOLA, J. 2000: *Sistemas de Ingeniería*. Editorial Félix Varela, La Habana, 482 p.
- CASTRO, R. 2000:** *Estudio metodológico para la optimización del secado forzado de biomasa lignocelulósica, en secadero de bandejas, en función de su poder calorífico superior*. Tesis doctoral. Universidad de León, Nuevo León, 231 p.
- CORVALAN, R.; HORN, M.; ROMAN, R. & SARAVIA, L. 1995:** *Ingeniería del secado solar*. CYTED-D.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; BATISTA, N. & DONATIÉN, A. 2005:** Resultados en la industria minera del secado solar y la homogeneización de minerales en pilas a la intemperie. En: Memorias de la Conferencia Internacional de Energía y Medio Ambiente CIEMA '05, Santiago de Cuba, noviembre 8-11, [CD-ROM] ISBN 959-2007-198-5.
- 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, marzo 20-23, ISBN 978-959-7117-16-2.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; BATISTA, N.; DONATIÉN, A. & PÉREZ, N. 2007b:** Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria niquelífera Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana, marzo 20-23, ISBN 978-959-7117-16-2.
- 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: III Congreso Cubano de Minería. La Habana, marzo 16-20, ISBN 978-959-7117-19-3.

- FAYETT, D. 2008:** *Optimización del proceso de secado solar para lodos residuales y cuantificación de metales pesados*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, 46 p.
- FERREIRA, S. & COSTA, A. 2009:** Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica* 20(2): 89-104.
- HOSSAIN, M.; WOODS, J.; BALA, B. 2005:** Optimization of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renewable Energy* 30(5): 729-742.
- LEGRÁ, A.; SILVA, O. 2011:** *La investigación científica: conceptos y reflexiones*. Editorial Félix Varela, La Habana, 445 p.
- MCQUISTON, F.; PARKER, J.; SPITLER, J. 2008.** *Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y Diseño*. Editorial Limusa Wiley, México DF, 622 p.
- MONTERO, I. 2005:** *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura, Badajoz, 262 p.
- OCAMPO, A. 2006:** Modelo cinético del secado de la pulpa de mango *Revista EIA* 26(5): 119-128.
- RETIRADO, Y. & LEGRÁ, A. 2011** (en línea): Modelación matemática del área de exposición y el volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. *Minería & Geología*, 27 (2): 84-108. Consultado: 10 de julio de 2011 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RETIRADO, Y. 2007:** Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 71 p.
- RETIRADO, Y. 2010:** Estudio experimental del proceso de secado solar de las menas lateríticas empleadas en la industria del níquel en Moa. En: Fórum tecnológico especial de energía. Moa, diciembre 8-9, ISBN: 978-959-16-1216-8.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & ROJAS, A. 2007** (en línea): Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. *Minería & Geología*, 23 (3). Consultado: 20 de diciembre de 2010 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & HERNÁNDEZ, N. 2009** (en línea): Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería & Geología* 25 (1):13-21. Consultado: 20 de diciembre de 2010 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E. & HERNÁNDEZ, N. 2008:** Cinética del secado solar del mineral laterítico empleado en la Industria del níquel en Moa. En: 5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. CD-ROM. ISBN: 978-959-257-186-0.

- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E.; LAMORÚ, M.; LEYVA, B. & GARCÍA, D. 2011**(en línea): Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería & Geología* 27(1):1-21 Consultado: 25 de mayo de 2011 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- RICAUARTE, C. & LEGRÁ, A. 2010** (en línea): Contribución al cálculo del área de la sección de la carga en la banda transportadora de mineral laterítico. *Minería & Geología* 26 (3):1-22. Consultado: 13 marzo 2011 [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- SIERRA, R. 2010**: Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 98 p.
- SIMATE, I. 2003**: Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers. *Renewable Energy* 28(3):435-453.
- SMOUT, C.; BANADDA, N.; VAN LOEY, A.; HENDRICKX, M. 2003**: Nonuniformity in lethality and quality in thermal process optimization: A case study on color degradation of green peas. *Journal of Food Science* 68(2): 545-550.
- TIWARI, G & SARKAR, B. 2006**: Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International* 8(16): 1-9.
- VINARDELL, J. 2011**: Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 63 p.

**Yoalbys Retirado-Mediaceja**

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

[yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu)**Aristides Alejandro Legrá-Lobaina**

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

[alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu)**Marbelis Lamorú-Urgelles**

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

[mlamoru@ismm.edu.cu](mailto:mlamoru@ismm.edu.cu)**Enrique Torres-Tamayo**

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

[etorrest@ismm.edu.cu](mailto:etorrest@ismm.edu.cu)**Héctor Luis Laurencio-Alfonso**

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

[hlaurencio@ismm.edu.cu](mailto:hlaurencio@ismm.edu.cu)