

**Aplicación informática para calcular área y volumen de pilas de tierra mineral almacenadas a granel**

*Computer application to calculate area and volume of mineral soil stockpiles stored in bulk*

Yoalbys Retirado Mediaceja<sup>1</sup>; Arístides Alejandro Legrá Lobaina<sup>1</sup>; Marlo Antonio Leyva Tarafa<sup>1</sup>; Marbelis Lamorú Urgelles<sup>1</sup>; María de Lourdes Pérez Lamorú<sup>1</sup>

**RESUMEN:**

En la empresa cubana productora de níquel y cobalto Comandante Ernesto Che Guevara la tierra mineral es expuesta al secado solar natural en forma de pilas a granel. El cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas es un proceso engorroso y lento debido a la complejidad de los modelos matemáticos que caracterizan a estos parámetros. Para mitigar esta dificultad en el presente trabajo se crea una aplicación informática que permite automatizar el cálculo de los referidos parámetros para pilas de tierra mineral con simetría axial y diferentes geometrías de su sección transversal. Los resultados obtenidos evidenciaron que el comportamiento de ambos parámetros es creciente con el incremento de la inclinación de la superficie de secado de las pilas y que la implementación práctica del proceso en la empresa niquelífera debe realizarse con pilas de minerales con superficies de secado inclinadas entre 45 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal.

**Palabras claves:** aplicación informática; área; volumen; tierra mineral; pilas a granel; secado solar natural.

**ABSTRACT:**

*At the Cuban nickel and cobalt producer Comandante Ernesto Che Guevara the laterite ore is exposed to natural solar drying in the form of bulk piles. The calculation of the exposure area and the volume of the piles is a cumbersome and slow process due to the complexity of the mathematical models that characterize these parameters. To mitigate this difficulty, in this work a computer application is created to automate the calculation of these parameters for laterite ore piles with axial symmetry and different cross-sectional geometries. The results obtained showed that the behavior of both parameters is increasing with the increase of the inclination of the drying surface of the heaps and that the practical implementation of the process in the nickel company should be carried out with ore heaps with drying surfaces inclined between 45 and 60 degrees sexagesimal, with respect to the horizontal plane.*

**Keywords:** computer application; area; volume; mineral soil; bulk piles; natural solar drying.

Recibido 12 de octubre de 2023; revisión aceptada 16 de enero de 2024

<sup>1</sup> Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez, Moa, Cuba, [yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu); [alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu); [mltarafa@ismm.edu.cu](mailto:mltarafa@ismm.edu.cu); [mlamor@ismm.edu.cu](mailto:mlamor@ismm.edu.cu); [mlperez@ismm.edu.cu](mailto:mlperez@ismm.edu.cu).

## 1. INTRODUCCIÓN

El establecimiento de modelos matemáticos de los parámetros fundamentales del secado solar natural de la tierra mineral (mena laterítica), y su posterior implementación en una aplicación informática, permite el estudio teórico del proceso y posibilita realizar simulaciones computacionales del mismo, mediante el empleo de adecuados sistemas informáticos. Esta posibilidad constituye una alternativa tecnológicamente viable para predecir el comportamiento del área de exposición y el volumen de las pilas de material cuando las variables independientes y los parámetros de los modelos toman ciertos valores [1]. Además, las simulaciones computacionales contribuyen a racionalizar la implementación del secado solar natural en las condiciones de explotación de la empresa cubana productora de níquel y cobalto [2], [3].

En la actualidad existen *software* profesionales como el Mathcad, el MATLAB y otros que pueden ser empleados en el cálculo de los parámetros del secado natural de la tierra mineral y, en particular, para la determinación del área de exposición y el volumen de las pilas. Sin embargo, los mencionados paquetes informáticos son generales y, por tanto, no contienen los aspectos específicos y las ecuaciones particulares del proceso investigado. Para resolver esta problemática se desarrolla el presente trabajo el cual tiene como objetivo automatizar el procedimiento y los modelos matemáticos establecidos para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas de tierra mineral expuestas al secado solar natural, mediante su implementación en una aplicación informática.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Caracterización de la geometría de la sección transversal de las pilas

La geometría de la sección transversal que adquiere una pila de tierra mineral, al ser depositado el material a granel, depende de los ángulos de reposo maximal y tangencial (Figura 1). Según Ricaurte y Legrá [4], obedece a las condiciones siguientes (Tabla 1):

**Tabla 1.** Geometrías probables de la sección transversal de las pilas [4].

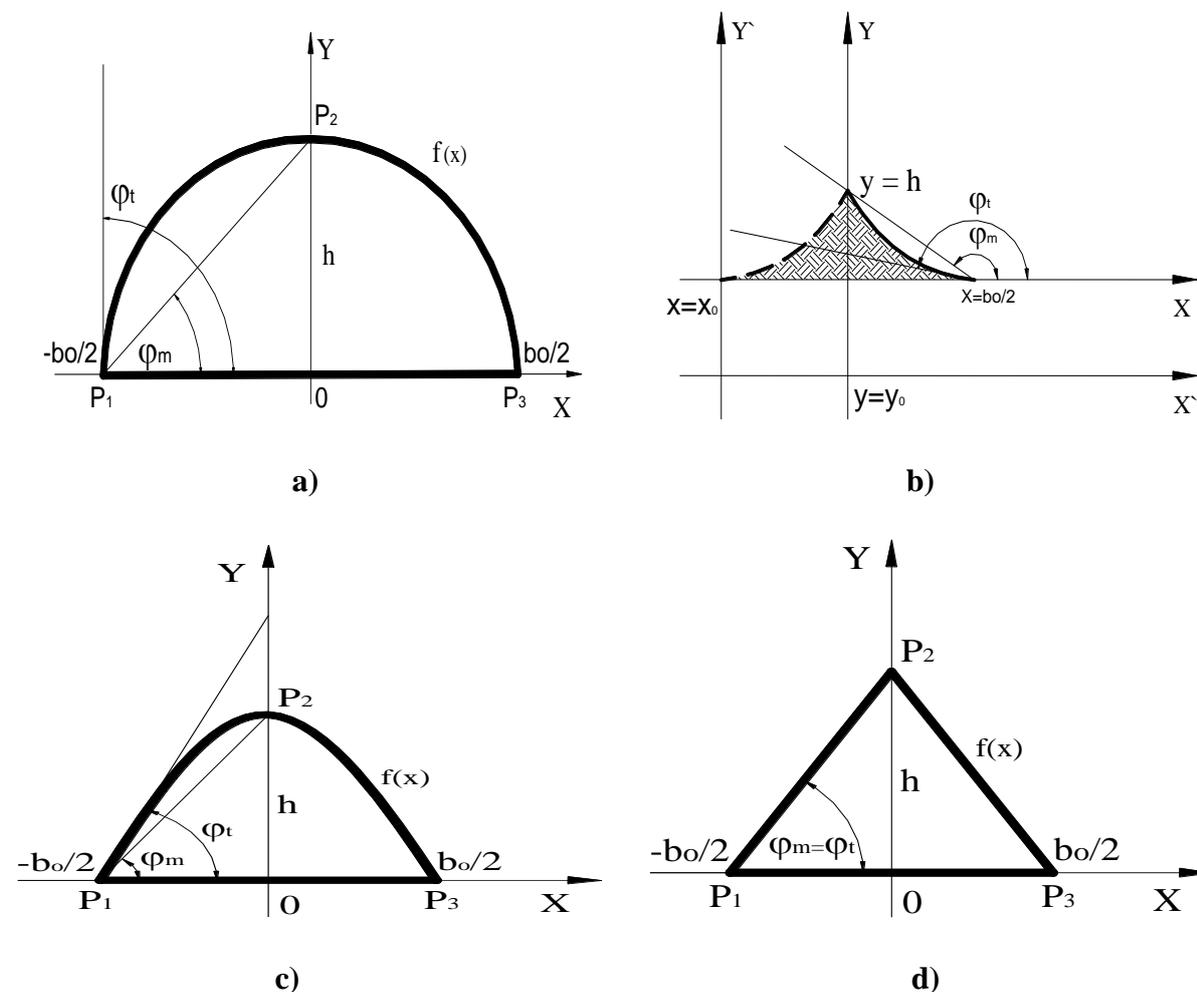
Variante posible	Condición que debe cumplirse	Tipo de sección transversal
a)	$\varphi_m < \varphi_t$ y $\varphi_t \approx 90^\circ$	semi-elíptica
b)	$\varphi_m \gg \varphi_t$ y se asume que $\varphi_m - \varphi_t > 60^\circ$	hiperbólica
c)	$\varphi_m < \varphi_t$ y $\varphi_t - \varphi_m \leq 60^\circ$	parabólica
d)	$\varphi_m = \varphi_t$	triangular

Donde:

$\varphi_m$ : ángulo de reposo maximal de la pila; grados sexagesimales.

$\varphi_t$ : ángulo de reposo tangencial de la pila; grados sexagesimales.

Los valores de los ángulos  $\varphi_m$  y  $\varphi_t$ , se calculan mediante trigonometría (enfoque tradicional) o como una función de la granulometría y humedad promedios de las lateritas cubanas (nuevo enfoque), para ello se emplean las ecuaciones empíricas 1 y 2 [5].



**Figura 1.** Vista frontal de la forma geométrica que puede adoptar la sección transversal de las pilas de lateritas expuestas a secado [4].

$$\varphi_m = 30,58 - 0,4592 \cdot G_m - 0,00496 \cdot G_m \cdot H_m + 0,00651 \cdot G_m^2 + 0,01109 \cdot H_m^2 \quad (1)$$

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

Para utilizar las ecuaciones 1 y 2 debe cumplirse que:

$$5 \text{ mm} \leq G_m \leq 78 \text{ mm} \text{ y } 26 \% \leq H_m \leq 42 \%$$

Donde:

$G_m$ : granulometría promedio de la tierra mineral; (mm).

$H_m$ : humedad promedio de la tierra mineral; (%).

## 2.2. Modelos para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas

Para obtener el área de exposición y el volumen de una pila de tierra mineral se tienen en cuenta las partes laterales y frontales de la misma [6]. De forma general, se puede establecer la expresión 3 para el cálculo del área superficial de una pila de minerales formada simétricamente.

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_{SF} \quad (3)$$

Los términos  $A_{SL}$  y  $A_{SF}$  se determinan por las expresiones 4 y 5 [7].

$$A_{SL} = 2 \cdot L_{SL} \cdot \int_0^{b_0/2} \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (4)$$

$$A_{SF} = 2\pi \cdot \int_0^{b_0/2} x \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (5)$$

Donde:

$A$ : área de exposición (de captación solar) de la pila; ( $m^2$ ).

$A_{SL}$ : área de la superficie lateral; ( $m^2$ ).

$A_{SF}$ : área de la superficie frontal; ( $m^2$ ).

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

$b_0$ : ancho de la base; (m).

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

El área de exposición de la pila se obtiene sustituyendo las ecuaciones 4 y 5 en la 3. Después de algunas transformaciones resulta que:

$$A = 2 \cdot \int_0^{b_0/2} [L_{SL} + \pi \cdot x] \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (6)$$

El volumen de la pila se calcula por la ecuación 7, mientras que los volúmenes de la parte lateral y las partes frontales se determinan por las expresiones 8 y 9, respectivamente [4], [6], [7].

$$V = V_{SL} + V_{SF} \quad (7)$$

Siendo:

$$V_{SL} = A_{STSL} \cdot L_{SL} = b_o^2 \cdot k_f \cdot L_{SL} \quad (8)$$

$$V_{SF} = 2\pi \cdot \int_0^{b_o/2} x \cdot f(x) dx \quad (9)$$

Donde:

$V$ : volumen de la pila; ( $m^3$ ).

$V_{SL}$ : volumen de la parte lateral de la pila; ( $m^3$ ).

$V_{SF}$ : volumen de la parte frontal de la pila; ( $m^3$ ).

$A_{STSL}$ : área de la sección transversal de la superficie lateral; ( $m^2$ ).

$k_f$ : coeficiente de forma, depende de la geometría de la sección transversal; (adimensional).

La función  $f(x)$  y el coeficiente de forma ( $k_f$ ) pueden calcularse, para las pilas de sección transversal semi-elíptica, hiperbólica, parabólica y triangular, por las ecuaciones que se muestran en la Figura 2 [6], [7]. Por su parte, los modelos específicos para el cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas fueron establecidos por Retirado y Legrá [6]. Estos tienen en cuenta la forma geométrica de las pilas y las particularidades del proceso [8].

### **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1. Implementación de los modelos en una aplicación informática**

Los modelos matemáticos (ecuaciones 1-9) fueron implementados en una aplicación informática denominada “SecSolar” [1], la cual fue creada en el Centro de Estudio de Energía de la Universidad de Moa. La aplicación permite calcular los parámetros del proceso de secado solar de las lateritas para las condiciones de explotación de la empresa productora de níquel y cobalto. La misma consta de cinco pestañas (áreas y volúmenes de pilas; diseño de pilas según radiación solar recibida; cálculo del calor total; dinámica del calor y dinámica del secado), siendo de interés para este trabajo la primera.

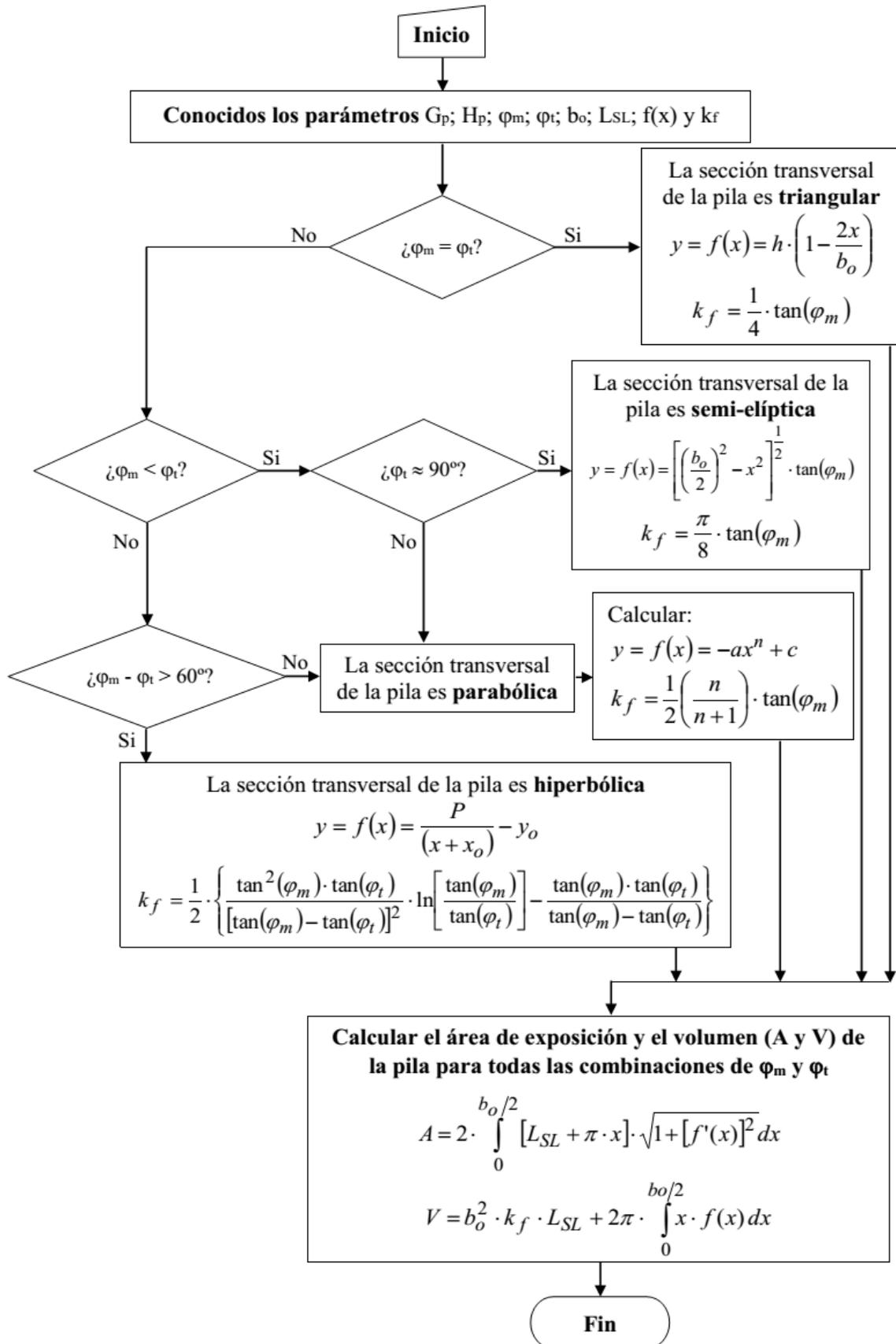


Figura 2. Algoritmo utilizado por la aplicación informática para el cálculo del área y el volumen de las pilas de tierra mineral.

### 3.2. Pestaña denominada “Áreas y volúmenes de pilas”

Esta ventana permite calcular el valor puntual de la altura de la pila, el área de la sección transversal, la longitud de la superficie lateral, el área de la superficie y el volumen (Figura 3). Nótese que se caracteriza la forma geométrica de la sección transversal de la pila y se realiza el gráfico lateral, además se calculan, con la opción “Llenar Tablas”, todos los valores del área de exposición y el volumen de la pila cuando los ángulos maximal y tangencial varían entre 0 y 90 grados. Luego, ejecutando la opción GT (Guardar Tablas), se guardan los parámetros de interés calculados. El diagrama general utilizado se muestra en la Figura 2.

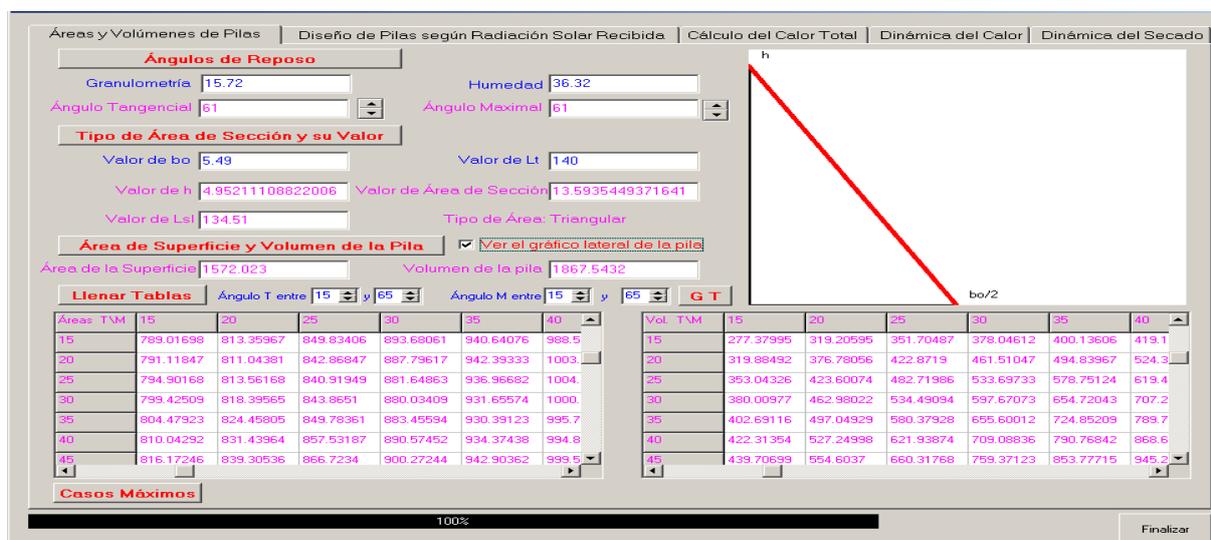


Figura 3. Pestaña creada para calcular el área de exposición y el volumen de las pilas de tierra mineral.

La aplicación informática “SecSolar” se desarrolló usando el *software Borland Delphi Enterprise* Versión 7.0 [8], la misma es compatible con cualquier versión igual o superior del sistema operativo Windows 2000, precisando al menos 512 MB de memoria RAM y 40 GB de memoria en disco. Otras aplicaciones informáticas similares a la expuesta aquí fueron creadas para la automatización, la planificación y el control integral de la minería en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara [9], [10].

### 3.3. Implementación de la aplicación informática creada

Para desarrollar este epígrafe se calcula el área de exposición y el volumen para una pila de tierra mineral de 700 toneladas; 140 m de largo y 5,49 m de ancho de la base (Figura 4). Se escogió esta porque sus características geométricas son semejantes a las que tienen las pilas de material utilizadas en la implementación del secado solar natural en la empresa niquelífera [2], [3], [11], [12].



Figura 4. Implementación práctica del proceso de secado solar natural de las lateritas niquelíferas en pilas a granel [8].

### 3.4. Cálculo del área de exposición y el volumen de la pila

En la Tabla 2 se relacionan los valores obtenidos para el área de exposición y el volumen de la pila en función de la variación de los ángulos maximal y tangencial. El algoritmo empleado permite determinar los citados parámetros y simular el secado solar para las pilas de minerales con diferentes geometrías de su sección transversal (Figura 5).

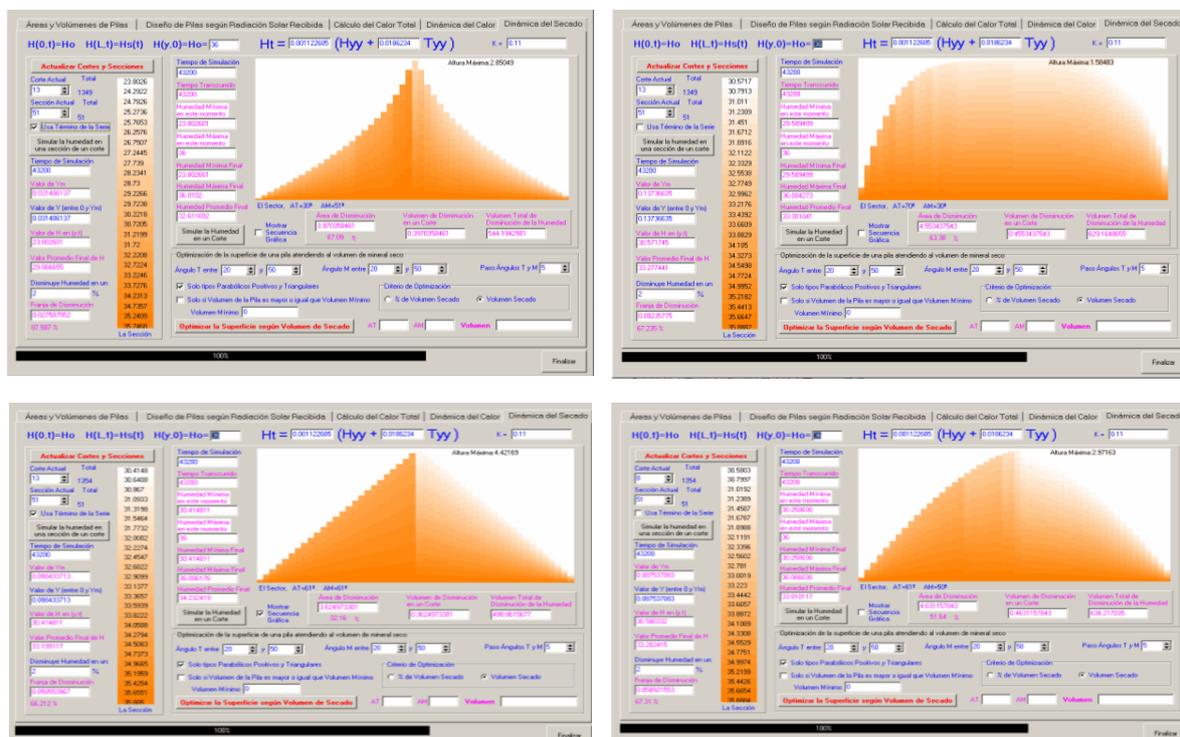


Figura 5. Simulaciones computacionales del proceso de secado solar natural de las pilas a granel de tierra mineral.

**Tabla 2.** Área de exposición y volumen de la pila de tierra mineral para diferentes combinaciones de los ángulos maximal y tangencial.

$\varphi_m \rightarrow$ $\varphi_t \downarrow$	Área de exposición de la pila (m <sup>2</sup> )								
	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°
15°	849,8	893,7	940,6	988,5	1036,4	1084,1	1131,5	1179,1	1227,1
20°	842,9	887,8	942,4	1003,2	1068,1	1136,1	1206,8	1280,5	1357,5
25°	<b>840,9</b>	881,6	937,0	1004,4	1081,5	1166,5	1259,1	1359,2	1467,6
30°	843,9	<b>880,0</b>	931,7	1000,2	1084,1	1181,9	1293,3	1418,6	1559,1
35°	849,8	883,5	<b>930,4</b>	995,7	1081,5	1187,4	1313,6	1461,4	1633,6
40°	857,5	890,6	934,4	<b>994,9</b>	1078,1	1187,2	1323,6	1490,5	1692,3
45°	866,7	900,3	942,9	999,6	<b>1077,8</b>	1185,2	1327,0	1508,2	1736,6
50°	877,3	912,1	955,0	1009,8	1083,4	<b>1185,7</b>	1327,2	1517,2	1767,5
55°	889,5	926,2	970,2	1025,0	1095,9	1192,4	<b>1328,7</b>	1520,9	1786,6
60°	903,6	942,7	988,7	1044,7	1115,2	1208,1	1337,2	<b>1524,3</b>	1796,7
65°	920,2	962,3	1011,1	1069,4	1141,2	1233,4	1357,5	1535,2	<b>1803,4</b>
$\varphi_m \rightarrow$ $\varphi_t \downarrow$	Volumen de la pila (m <sup>3</sup> ) ↓								
	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°
15°	351,7	378,0	400,1	419,2	436,0	451,3	465,3	478,5	491,0
20°	422,9	461,5	494,8	524,3	550,9	575,4	598,4	620,4	641,6
25°	<b>482,7</b>	533,7	578,8	619,4	656,9	692,1	725,6	758,1	790,1
30°	534,5	<b>597,7</b>	654,7	707,3	756,5	803,5	849,0	893,8	938,6
35°	580,4	655,6	<b>724,9</b>	789,8	851,7	911,7	970,7	1029,7	1089,6
40°	621,9	709,1	790,8	<b>868,6</b>	944,1	1018,3	1092,5	1167,8	1245,4
45°	660,3	759,4	853,8	945,2	<b>1035,2</b>	1125,1	1216,3	1310,3	1408,8
50°	696,4	807,4	915,0	1020,8	1126,5	<b>1233,7</b>	1344,2	1459,9	1583,1
55°	730,9	854,2	975,4	1096,5	1219,3	1345,9	<b>1478,4</b>	1619,5	1772,5
60°	764,4	900,3	1035,9	1173,5	1315,3	1463,7	1621,7	<b>1793,0</b>	1982,4
65°	797,5	946,5	1097,5	1253,1	1416,1	1589,5	1777,5	1985,3	<b>2220,0</b>

Sobre el cálculo del área y el volumen resulta interesante destacar que al utilizar los modelos expuestos en este trabajo solo se requiere conocer las dimensiones (largo y ancho) de la superficie horizontal disponible para el secado natural, datos que siempre están disponibles y los ángulos maximal y tangencial de la pila de minerales, los cuales se pueden determinar conociendo los valores promedios de la granulometría y humedad del material (ver ecuaciones 1 y 2). Estas propiedades físicas de las lateríticas también son conocidas por los obreros e investigadores encargados de implementar el proceso en la empresa niquelífera.

Los comportamientos mostrados en las Figuras 6 y 7 indican que el área de exposición y el volumen de la pila aumentan en la medida en que se incrementan los ángulos maximal y tangencial. Sin embargo, aunque la tendencia al crecimiento es común en ambos parámetros, se observa que la diferencia entre los valores extremos (máximo y mínimo) es más acentuada en el caso del volumen. Por tanto, al variar los ángulos maximal y tangencial se pueden obtener

variaciones en el volumen (incrementos o decrecimientos, según corresponda) que son superiores a los que se obtienen para el área de exposición.

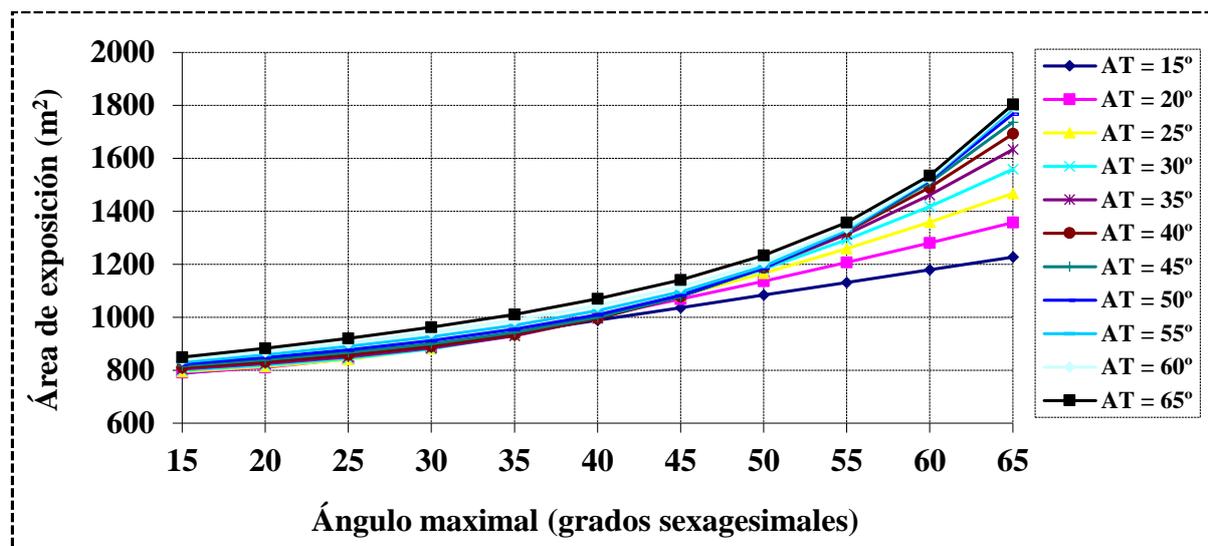


Figura 6. Comportamiento del área de exposición de la pila de tierra mineral.

Por otra parte, aunque es importante valorar las tendencias (crecientes o decrecientes) que reflejan el área de exposición y el volumen de la pila, durante la implementación práctica del proceso de secado solar natural se debe considerar que no necesariamente se obtienen eficiencias (térmicas y metalúrgicas) económicamente racionales en las pilas de mayor área de exposición y volumen. Resultan más convenientes aquellas pilas en las que los procesos de transferencia de calor y masa se intensifican como resultado de una mayor captación de energía térmica (solar y eólica) en la superficie se secado y que, a la vez, sus volúmenes sean suficientemente grandes para satisfacer la productividad requerida por la empresa productora de níquel y cobalto [13].

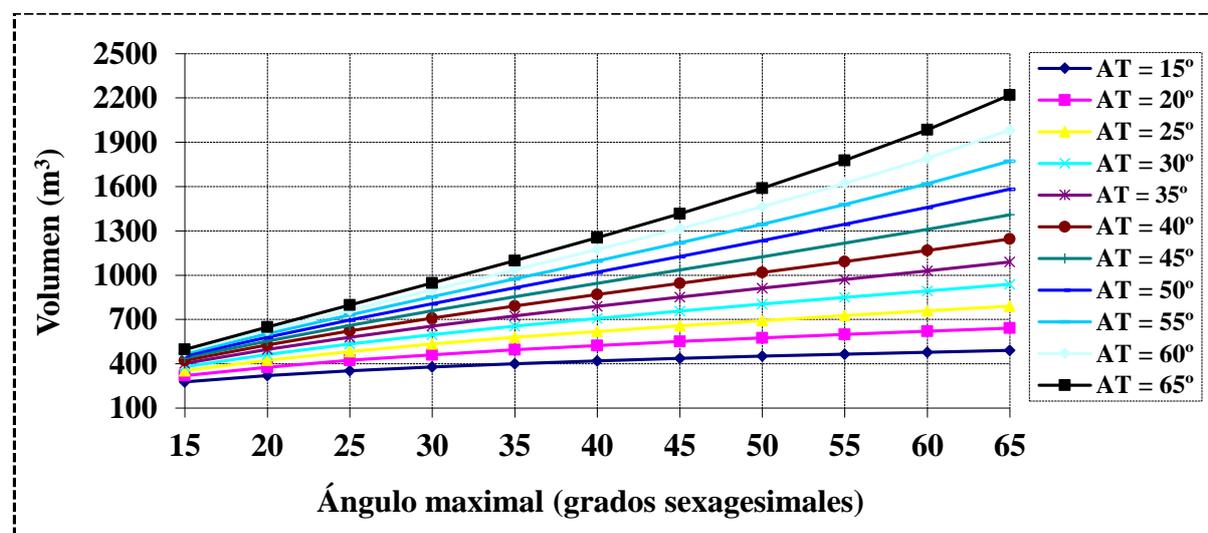


Figura 7. Comportamiento del volumen de la pila de material expuesto a secado natural.

Al valorar integralmente los criterios anteriores se recomienda que la implementación práctica del proceso en la referida empresa se realice con pilas de minerales inclinadas entre 45 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal. Este aspecto ha sido corroborado en investigaciones precedentes [13], [14].

#### **4. CONCLUSIONES**

- La implementación de los modelos, en la aplicación informática “SecSolar”, posibilitó la automatización del procedimiento de cálculo del área de exposición y el volumen de las pilas a granel de tierra mineral expuestas a secado natural, que tienen simetría axial y diferentes geometrías de su sección transversal. La tendencia de ambos parámetros fue creciente con el incremento de la inclinación de la superficie de secado de la pila.
- La automatización realizada facilita el cálculo de los parámetros geométricos de las pilas, disminuye el tiempo de cómputo, aumenta la precisión de los resultados obtenidos y posibilita el desarrollo de iteraciones para todos los valores de los ángulos maximal y tangencial. Estas ventajas constituyen la base para el análisis energético del proceso.
- La implementación práctica del secado solar natural en la empresa niquelífera, para que sea energéticamente racional, debe desarrollarse con pilas a granel que tengan la superficie de secado inclinada entre 45 y 60 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal.

#### **5. BIBLIOGRAFÍA**

- [1]. Retirado, Y.; A. Legrá; H. Laurencio; A. Gilbert; C. Zalazar; L. Osorio & E. Gresesqui. “Aplicación informática basada en modelos matemáticos del secado natural de la mena laterítica”. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 2017, 11(2): 102-116. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci>.
- [2]. Estenoz, S.; A. Alderí; N. Batista; A. Donatién; N. Pérez. “Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara”. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana. 2007.
- [3]. Belete, O.; Estenoz, S. “Comportamiento del secado solar de lateritas a la intemperie en condiciones de clima húmedo tropical”. *Holos*, 2020, 1(3): 1-13. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.7011>.
- [4]. Ricaurte, C.; A. Legrá. “Contribución al cálculo del área de la sección de la carga en la banda transportadora de mineral laterítico”. *Minería y Geología*, 2011, 26(3): 1-22. Consultado: 25 de enero de 2024. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [5]. Sierra, R. “Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel”. Tesis Doctoral. ISMMM. 2010. 166 h.
- [6]. Retirado, Y.; A. Legrá. “Modelación matemática del área de exposición y del

- volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural”. *Minería y Geología*, 2011, 27(2): 84-108. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [7]. Stewart, J. “Cálculo con trascendente tempranas”. 4 ed. La Habana: Editorial Félix Varela, 2009. 3 t.
- [8]. Retirado, Y. “Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas”. Tesis Doctoral. ISMMM. 2012. 121h.
- [9]. Legrá, A. “Metodología para el pronóstico, planificación y control integral de la minería en yacimientos lateríticos”. Tesis Doctoral. ISMMM. 1999. 191 h.
- [10]. Legrá, A. “Automatización del control del cálculo de extracciones en la mina de la empresa niquelera Ernesto Che Guevara”. *Minería y Geología*, 2010, 26 (2): 55-73. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [11]. Estenoz, S. “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. 2009.
- [12]. Vinardell, J. “Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas”. Tesis de Maestría. ISMMM. 2011. 63 h.
- [13]. Retirado, Y.; A. Legrá; A. Gilbert; E. Salazar; J. Salazar & M. Mendoza. “Influencia de la inclinación de las pilas en el secado natural de la mena laterítica”. *Minería y Geología*, 2016, 32(3): 113-127. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [14]. Retirado, Y.; A. Legrá; M. Lamorú; E. Torres; H. Laurencio. “Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel”. *Minería y Geología*, 2012, 28(2): 30 - 46. Consultado: 1 de febrero de 2024. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).