

**Mecanismo de transporte de la humedad en pilas de lateritas sometidas a secado eólico y solar**

*Moisture transport mechanism in stockpile subjected to wind and solar drying*

Yoalbys Retirado Mediaceja<sup>1,2</sup>, Arístides Alejandro Legrá-Lobaina<sup>1</sup>, Marbelis Lamorú Urgelles<sup>1</sup>, María de Lourdes Pérez Lamorú<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.61236/ciya.v9i2.1096>

**RESUMEN:**

En la industria cubana del níquel se implementa de forma empírica el secado eólico y solar de las lateritas, lo cual trae consigo imprecisiones en la estimación de la reducción de humedad que se logra durante el proceso. En el trabajo se desarrollaron simulaciones de la distribución de humedad en pilas de material expuestas a secado natural, mediante el uso de modelos, algoritmos y programas informáticos desarrollados en trabajos precedentes. El análisis energético evidenció que, como promedio, en los taludes Este y Oeste de la pila considerada se redujo la humedad en 0,410 y 0,490 %, respectivamente. Y en la pila completa la reducción fue de 0,450 % para un tiempo de secado de 12 horas, medidas entre las 6 y 18 horas. Los comportamientos obtenidos sugieren que durante el proceso de secado natural la humedad en las pilas se desplaza debido a un mecanismo de transporte mixto, que incluye los efectos combinados de la difusión de vapor, la difusión líquida y el movimiento de líquido.

**Palabras clave:** secado eólico y solar; lateritas; humedad; mecanismo de transporte.

**ABSTRACT:**

*In the Cuban nickel industry, wind and solar drying of laterites is implemented in an empirical way, which leads to inaccuracies in the estimation of moisture reduction achieved during the process. In this work, simulations of moisture distribution in piles of material exposed to natural drying were developed using models, algorithms and computer programs developed in previous works. The energy analysis showed that, on average, in the east and west slopes of the pile considered, moisture was reduced by 0.410 and 0.490 %, respectively. And in the complete pile the reduction was 0.450 % for a drying time of 12 hours, measured between 6 and 18 hours. The obtained behaviors suggest that during the natural drying process the moisture in the piles moves due to a mixed transport mechanism, which includes the combined effects of vapor diffusion, liquid diffusion and liquid movement.*

**Keywords:** wind and solar drying; laterite ore; moisture; transport mechanism.

**Recibido:** 12 de enero de 2025; **revisión aceptada:** 31 de mayo de 2025.

<sup>1</sup> Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Cuba. Email: yretirado@ismm.edu.cu (autor de correspondencia), alegra@ismm.edu.cu; mlamoru@ismm.edu.cu; mlperez@ismm.edu.cu

<sup>2</sup> Academia de Ciencias de Cuba (ACC). La Habana, Cuba.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de las tecnologías en el campo de la industria del níquel y la difícil situación económica actual de Cuba exigen, cada vez más, disminuir los consumos de portadores energéticos y que las instalaciones de las empresas niquelíferas sean más eficientes [1, 2].

Desde hace varios años, las empresas cubanas productoras de níquel y cobalto se encuentran enfrascadas en dos grandes cambios: la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada de níquel y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último, como proceso integral, no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia, la técnica y la innovación tecnológica [3].

Hoy día, existe una fábrica en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal: la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”. En esta industria metalúrgica se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, entre ellos se encuentran los procesos de secado térmico de las lateritas (tierra mineral): el convencional en cilindros rotatorios y el natural a la intemperie (Figura 1).



a) Secado convencional [39]

b) Secado natural (eólico y solar) [4].

Figura 1. Implementación del proceso de secado de las lateritas en Cuba.

Ambos procesos han sido estudiados a solicitud de la empresa. Sin embargo, las investigaciones más pertinentes dedicadas a la implementación del segundo (el secado eólico y solar) fueron desarrolladas en el Centro de Desarrollo de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) y la Universidad de Moa (UMoa). En ambas instituciones se obtuvieron resultados satisfactorios.

En las investigaciones desarrolladas en el CEDINIQ los autores diseñaron una tecnología para el secado solar natural a la intemperie de las lateritas que prevé las operaciones con pilas de

minerales en los depósitos mineros [5-8]. Esta tecnología tiene varias ventajas [29, 30], sin embargo, presenta las siguientes limitaciones: no considera el mecanismo de movimiento de la humedad en las pilas de minerales y no permite predecir la distribución de humedad que experimenta el material en las pilas durante el proceso de secado natural, por tanto, se dificulta estimar el tiempo de secado que se requiere para reducir su humedad desde un valor inicial conocido a otro valor final deseado [1-3].

Por su parte, las investigaciones desarrolladas en la UMOa defienden la idea de que se puede contribuir al perfeccionamiento de la tecnología empleada para la implementación del secado eólico y solar de las lateritas, a través de la simulación computacional basada en los modelos matemáticos del proceso [9-14], para ello se requiere la determinación del mecanismo de transporte de la humedad del material en las pilas. Este último aspecto no ha sido suficientemente valorado en los trabajos desarrollados en las empresas niquelíferas cubanas, debido a la alta complejidad que implica la obtención de los modelos físico-matemáticos específicos para el secado solar natural de las lateritas.

La problemática asociada a la modelación matemática del referido proceso ha sido resuelta en la investigación precedente consultada [3]. Los modelos establecidos por este autor posibilitan realizar simulaciones computacionales del secado natural de lateritas, mediante el empleo de adecuados sistemas informáticos, creados para tales propósitos [15]. Esta posibilidad constituye una alternativa tecnológicamente viable para predecir el comportamiento de la distribución de humedad del material y su mecanismo de transporte en las pilas cuando las variables independientes y los parámetros de los modelos matemáticos toman ciertos valores. Además, las simulaciones permiten racionalizar la implementación del proceso de secado natural en las condiciones de explotación de la empresa niquelífera cubana.

A nivel internacional la modelación matemática ha sido utilizada en diversas investigaciones con la finalidad de efectuar simulaciones computacionales del secado solar de diferentes materiales. Según la literatura consultada, [3,16], los estudios más difundidos analizan el secado de granos, café, arroz, madera, pulpa de bagazo y lodos, entre otros.

En el ámbito nacional, se han publicado trabajos que abordan la modelación del proceso de secado convencional, pero las investigaciones consultadas no contienen los modelos matemáticos del secado natural para los materiales analizados. Las mismas se dedican, fundamentalmente, al estudio energético y termodinámico del secado solar de café [17-20], granos [21], semillas [22, 23], plantas medicinales [24], madera [25, 26], productos varios [27]) y carbón mineral [28].

Actualmente, es escasa la literatura internacional que aborda el secado solar natural de los minerales lateríticos. En Cuba, los aspectos teóricos, experimentales y tecnológicos del proceso han sido estudiados [1, 4, 7, 29, 30], pero pocos autores han considerado la simulación de la distribución de humedad del material para pronosticar los tiempos de secado. Teniendo en cuenta lo anterior se declara como objetivo de este trabajo: determinar el mecanismo de movimiento de la humedad en las pilas de lateritas como herramienta a partir de simulaciones computacionales del proceso para las condiciones de explotación de empresa productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa.

En las próximas secciones del artículo se exponen los materiales y métodos, que incluyen los modelos y los datos experimentales usados en la simulación. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos, se definen las líneas futuras de investigación y se arriba a conclusiones sobre los aspectos más relevantes abordados en el trabajo.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Modelos para el cálculo de la distribución de humedad de las lateritas**

La expresión que caracteriza la distribución de humedad  $[H(y, \tau)]$  en las pilas de lateritas expuestas a secado natural se determina resolviendo la ecuación 1, con las condiciones iniciales y de frontera representadas en el sistema de ecuaciones 2 [23].

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} - k_u \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = f(y, \tau) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H(y, 0) &= \Omega(y) \\ H(0, \tau) &= H_0 \\ H(l, \tau) &= H_s(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$H$ : humedad de las lateritas; kg/kg.

$k_u$ : coeficiente de conducción de humedad de las lateritas; m<sup>2</sup>/s.

$\Omega(y)$ : función que caracteriza el cambio de  $H_0$  en cada instante  $\tau$  y posición “ $y$ ”; kg/kg.

$H_0$  y  $H_s(\tau)$ : humedad inicial del mineral y humedad en la superficie de la pila ( $y = l$ ); kg/kg.

Para resolver la ecuación 1 se aplicó el método de separación de variables, teniendo en cuenta la Figura 2. Y luego de varias transformaciones se obtuvo el modelo matemático representado en la ecuación 3.

La expresión 3, obtenida para  $\Omega(y) = H_1 = constante$ , constituye el modelo matemático útil para el cálculo de la distribución de humedad del material en las pilas de lateritas expuestas a secado natural, en las condiciones de explotación de la empresa niquelífera cubana [16]. Para el caso general [donde  $\Omega(y) = variable$ ] se obtiene la expresión de  $H(y, \tau)$  mostrada en la Figura 3.

Los referidos modelos matemáticos, y los procedimientos de cálculo de los parámetros fundamentales del secado solar, se sistematizaron y programaron en la aplicación informática “SecSolar”, la cual fue creada para las simulaciones computacionales realizadas para la distribución de humedad del material en las pilas [15].

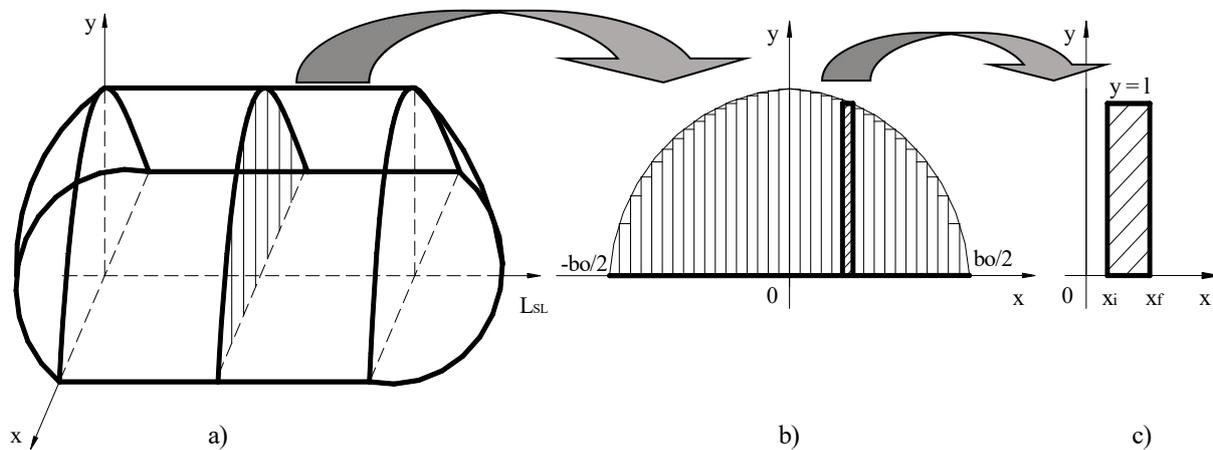


Figura 2. Esquema para el análisis de la distribución de humedad en las pilas de lateritas [16].

a) Pila de minerales; b) Corte de la sección transversal; c) Sección analizada.

$$H(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \cdot \left[ \cos(n\pi) \cdot \left[ \frac{2 \cdot \int_0^{\tau} e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} R_n(\theta) \cdot d\theta - 2 \cdot [H_1 - H(0)]}{n\pi} + \frac{2[H_0 - H(0)] \cdot \text{sen}(n\pi)}{n^2 \pi^2} - \frac{2(H_0 - H_1)}{n\pi} \right] + \text{sen}\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \right] \quad (3)$$

Donde:

$H(y, \tau)$ : distribución de humedad de las lateritas en cada instante de tiempo  $\tau$ ; kg/kg.

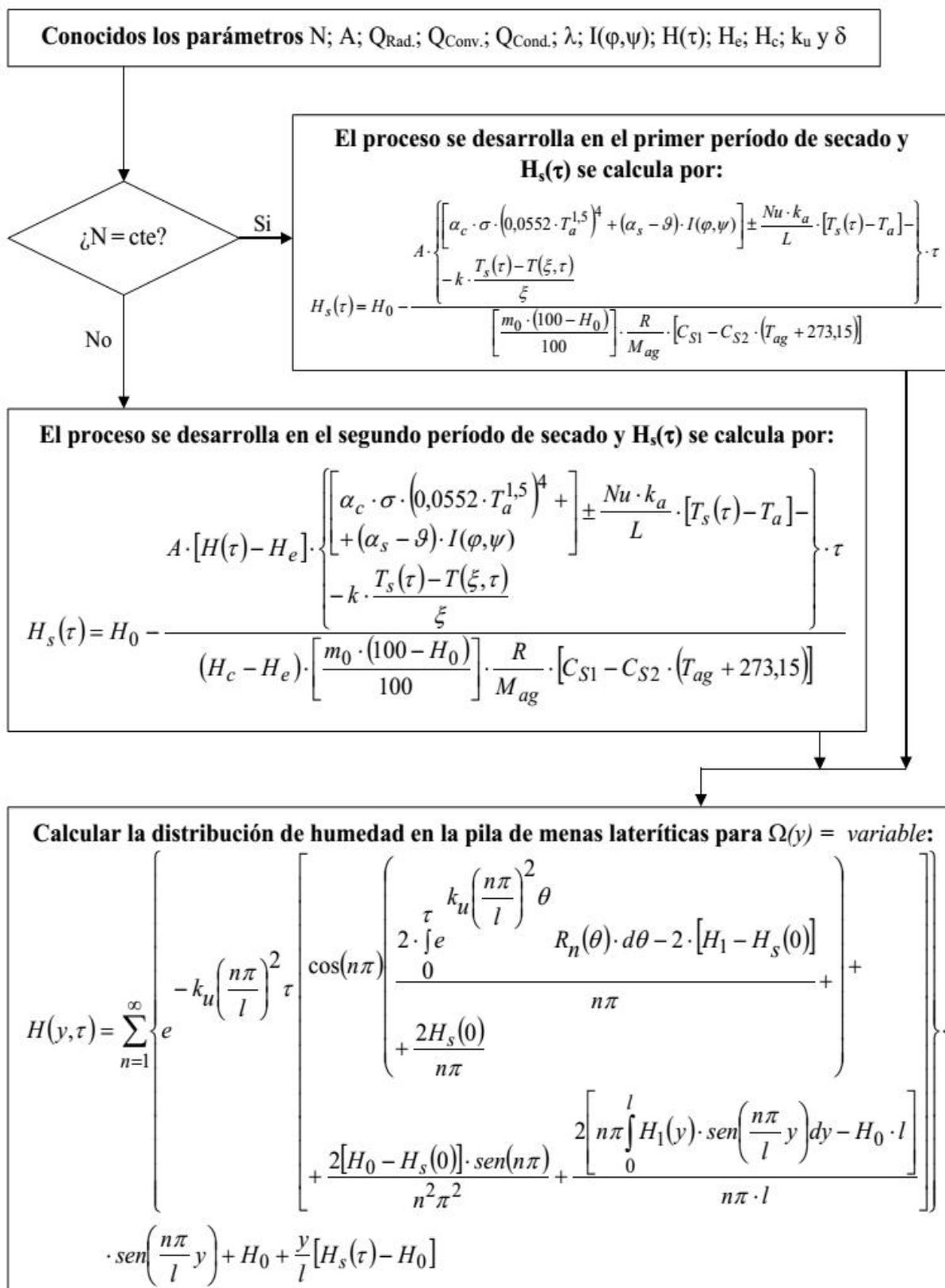


Figura 3. Algoritmo utilizado para el cálculo de la distribución de humedad en las pilas [15].

Donde:

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

$A$ : área de exposición de la pila;  $\text{m}^2$ .

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

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

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

$\lambda$ : calor latente de vaporización del agua;  $\text{J}/\text{kg}$ .

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

$H(\tau)$ : humedad del material en cada instante de tiempo  $\tau$ ;  $\text{kg}/\text{kg}$ .

$H_e$  y  $H_c$ : humedad de equilibrio del material y al finalizar el primer periodo de secado;  $\text{kg}/\text{kg}$ .

$k_u$ : coeficiente de conducción de humedad de las lateritas;  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$\delta$ : coeficiente térmico de conducción de humedad de la mena laterítica;  $1/^\circ\text{C}$ .

$\alpha_c$ : absortividad del cielo; adimensional.

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

$T_a$ : temperatura del aire;  $\text{K}$ .

$\vartheta$ : reflectividad de la mena laterítica; adimensionales.

$Nu$ : número de Nusselt; adimensional.

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

$L$ : longitud característica de la superficie de secado de la pila;  $\text{m}$ .

$T_s(\tau)$  y  $T(\xi, \tau)$ : temperatura en la superficie de la pila en el instante  $\tau$  y en el interior en el espesor  $\xi$ ;  $\text{K}$ .

$\xi$ : espesor de la capa de material donde se produce la conducción del calor;  $\text{m}$ .

$m_0$ : masa inicial de material sin secar;  $\text{kg}$ .

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

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

$C_{S1}$  y  $C_{S2}$ : constantes experimentales; adimensionales.

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

## **2.2. Condiciones establecidas para las simulaciones computacionales**

Se simuló el proceso de secado eólico y solar en pilas de lateritas con características semejantes a las utilizadas en el proceso industrial, estas son: sección transversal triangular; orientación longitudinal en la dirección del eje Norte-Sur; superficies de secado inclinadas en

30; 45; 60 y 75 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal; longitud de 140 m; ancho de la base de 5,49 m y humedad inicial del material de 36 %. Además, se emplearon las propiedades termofísicas del marial mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de las propiedades termofísicas usados en las simulaciones\*.

$k$ (W/m · °C)	$C_p$ (J/kg · °C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$\varepsilon$ (adimensional)	$\alpha_s$ (adimensional)
0,11	970	3 726	304,353 · 10 <sup>-6</sup>	0,93	0,63

\*Los valores corresponden a una temperatura de aproximadamente 300 K [3].

Siendo:  $k$  - conductividad térmica;  $C_p$  - calor específico a presión constante;  $\rho$  - densidad real;  $\alpha$  - difusividad térmica;  $\varepsilon$  - emisividad;  $\alpha_s$  - absorptividad solar.

La humedad del material se calculó con las ecuaciones de  $H(y, \tau)$ . Se emplearon los valores de las variables meteorológicas de la región donde está el patio de secado natural (Tabla 2).

Tabla 2. Valores diarios y promedios de las variables meteorológicas medidas.

	<b>Radiación solar global sobre superficie horizontal [I(φ,ψ)]</b>										<b>Promedio</b>
<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>06:00</b>	37	37	37	37	37	37	37	37	38	38	<b>37,20</b>
<b>07:00</b>	38	37	38	38	38	38	38	37	37	38	<b>37,70</b>
<b>08:00</b>	102	59	54	108	117	112	90	81	80	65	<b>86,80</b>
<b>09:00</b>	308	157	254	326	311	291	303	159	137	116	<b>236,20</b>
<b>10:00</b>	446	218	470	546	268	504	487	321	331	240	<b>383,10</b>
<b>11:00</b>	548	335	865	740	664	709	595	611	500	367	<b>593,40</b>
<b>12:00</b>	862	515	1072	853	708	436	356	609	487	411	<b>630,90</b>
<b>13:00</b>	890	657	1008	836	699	244	413	574	704	371	<b>639,60</b>
<b>14:00</b>	1028	938	915	864	462	104	100	405	828	562	<b>620,60</b>
<b>15:00</b>	962	641	779	741	73	91	94	72	837	421	<b>471,10</b>
<b>16:00</b>	559	602	662	494	43	125	107	84	586	336	<b>359,80</b>
<b>17:00</b>	88	496	460	83	46	127	110	216	283	235	<b>214,40</b>
<b>18:00</b>	51	153	217	82	50	89	86	125	121	96	<b>107,00</b>
	<b>Temperatura del aire [Ta]</b>										<b>Promedio</b>
<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>°C</b>

<b>06:00</b>	25,2	23,8	23,7	25,1	25,3	24,3	24,3	24,3	23,4	24,7	<b>24,4</b>
<b>07:00</b>	25,1	24,1	23,8	25,3	26,2	24,9	24,1	24,1	23,4	24,8	<b>24,6</b>
<b>08:00</b>	25,3	24,1	24,1	26,2	26,5	24,4	24,7	24,1	23,2	24,7	<b>24,7</b>
<b>09:00</b>	26,8	24,5	24,6	27,4	27,7	26,1	25,3	24,3	23,3	25,3	<b>25,5</b>
<b>10:00</b>	27,7	25,2	27,1	28,8	28,4	27,9	27,3	26,2	24,9	25,8	<b>26,9</b>
<b>11:00</b>	27,9	25,8	28,7	29,7	29,5	29,4	28,2	27,6	26,4	26,3	<b>28,0</b>
<b>12:00</b>	29,2	27,1	30,2	30,5	30,3	29,1	28,4	28,3	27,2	26,8	<b>28,7</b>
<b>13:00</b>	30,2	27,7	31,0	31,2	30,7	28,6	28,3	28,9	28,1	27,2	<b>29,2</b>
<b>14:00</b>	30,6	29,2	31,3	32,4	30,6	26,4	27,1	28,7	29,5	28,0	<b>29,4</b>
<b>15:00</b>	31,3	29,6	31,7	33,0	27,2	26,7	25,9	25,6	30,7	27,7	<b>28,9</b>
<b>16:00</b>	30,7	29,5	31,9	32,7	24,9	25,8	26,2	24,4	30,6	27,7	<b>28,4</b>
<b>17:00</b>	29,2	29,7	32,0	29,8	26,2	26,0	25,4	25,7	29,9	27,7	<b>28,2</b>
<b>18:00</b>	27,2	28,1	31,2	28,4	25,6	26,1	25,2	26,1	27,3	26,9	<b>27,2</b>
	<b>Velocidad del aire [Va]</b>										<b>Promedio</b>
<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>m/s</b>
<b>06:00</b>	4,9	2,2	2,7	2,2	3,1	2,2	1,3	2,7	1,8	0,9	<b>2,40</b>
<b>07:00</b>	8,0	4,9	2,7	1,8	1,8	1,8	1,8	2,7	1,3	1,3	<b>2,81</b>
<b>08:00</b>	4,0	4,9	2,2	0,9	1,8	2,7	0,9	2,7	2,2	1,3	<b>2,36</b>
<b>09:00</b>	4,5	6,7	2,2	1,8	1,8	1,3	1,8	2,2	2,7	0,9	<b>2,59</b>
<b>10:00</b>	5,8	6,3	2,2	2,2	2,2	1,8	1,8	3,6	2,2	1,8	<b>2,99</b>
<b>11:00</b>	7,2	4,9	3,6	3,1	4,0	4,9	1,8	4,5	2,7	2,2	<b>3,89</b>
<b>12:00</b>	6,7	5,8	4,5	3,6	6,3	5,4	1,8	4	3,1	2,2	<b>4,34</b>
<b>13:00</b>	7,6	6,3	4,0	4,5	5,8	4,9	3,1	4,9	3,1	2,2	<b>4,64</b>
<b>14:00</b>	8,9	6,3	4,0	4,9	6,3	7,2	11,6	10,3	3,6	4,9	<b>6,8</b>
<b>15:00</b>	8,9	7,2	4,0	4,5	6,1	5,8	6,3	11,2	4,5	5,8	<b>6,43</b>
<b>16:00</b>	8,9	7,6	4,9	5,8	5,4	1,8	2,7	5,4	6,7	4,9	<b>5,41</b>
<b>17:00</b>	7,6	7,2	4,5	9,8	1,3	0,9	2,2	5,8	7,2	3,1	<b>4,96</b>
<b>18:00</b>	4,9	11,2	4,0	8,0	1,8	1,3	2,2	4,0	11,6	5,8	<b>5,48</b>

### 2.3. Mecanismos de movimiento de la humedad

Para explicar el traslado de la humedad en los materiales porosos (caso estudiado), durante el proceso de secado, en la literatura científica se pueden encontrar referencias a diversos mecanismos de movimiento de la humedad, ellos son [31]:

- ✓ Difusión líquida: debido a los gradientes de concentración de humedad.
- ✓ Difusión de vapor: debido a los gradientes de presión parcial del vapor.
- ✓ Movimiento de líquido: debido a las fuerzas capilares.
- ✓ Flujo de líquido o vapor: debido a diferencias en la presión que existe en el interior de los poros y el agente secante.
- ✓ Efusión: se presenta cuando el camino libre medio de las moléculas de vapor es del orden del diámetro de los poros.
- ✓ Movimiento de líquido: debido a la gravedad.
- ✓ Difusión superficial: debido a los gradientes de concentración de humedad y de presión parcial del vapor que se generan en la superficie de secado.

De forma general, se considera que el mecanismo de flujo capilar es el que predomina durante el período de secado de velocidad constante, mientras que los mecanismos de condensación- evaporación y flujo de vapor corresponden al período de velocidad decreciente. El estudio de estos mecanismos, aplicados al análisis del proceso de secado, ha dado lugar a diferentes teorías de secado [32]. En este trabajo se consideró la teoría de Likov [33, 34], debido a su efectividad para explicar el proceso de secado de los materiales porosos.

### **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1. Simulaciones de la distribución de humedad en una pila seleccionada**

En general, se observan pequeñas reducciones en el contenido de humedad en las pilas de lateritas que no exceden el 2 y 3 % en los taludes Este y Oeste, respectivamente (Figuras 5 y 6). Estos resultados se corresponden con la baja cantidad de energía solar y eólica disponible para el proceso de secado natural y con las características del movimiento de la fuente de energía principal utilizada en el proceso: el Sol.

En la Figura 4 se observa que en el talud Este de la pila se obtienen reducciones en el contenido de humedad del material a partir de las 7:30 y hasta las 14:30 horas. Sin embargo, en el horario restante la humedad de las lateritas permanece prácticamente invariable. El comportamiento en la mañana (desde las 6 hasta las 7:30 horas) se debe a los bajos niveles de radiación solar existentes en ese horario y en la tarde (desde las 14:30 hasta las 18 horas) puede ser atribuido al efecto de la sombra que se genera producto de la inclinación de la superficie de secado de la pila y del movimiento diario del Sol.

En el talud Oeste de la pila (Figura 5) para las capas de mineral ubicadas entre 0 y 3,262 m de altura se obtienen reducciones de la humedad no mayores al 2 %, mientras que en las capas más cercanas a la superficie de la pila (desde valores de  $h = 3,729$  m hasta  $h = 4,568$  m) los niveles de reducción de la humedad oscilan entre 2,25 y 2,75 %. Sin embargo, como promedio, en los taludes Este y Oeste se redujo la humedad en 0,410 y 0,490 %; y en la pila completa la reducción fue de 0,450 %.

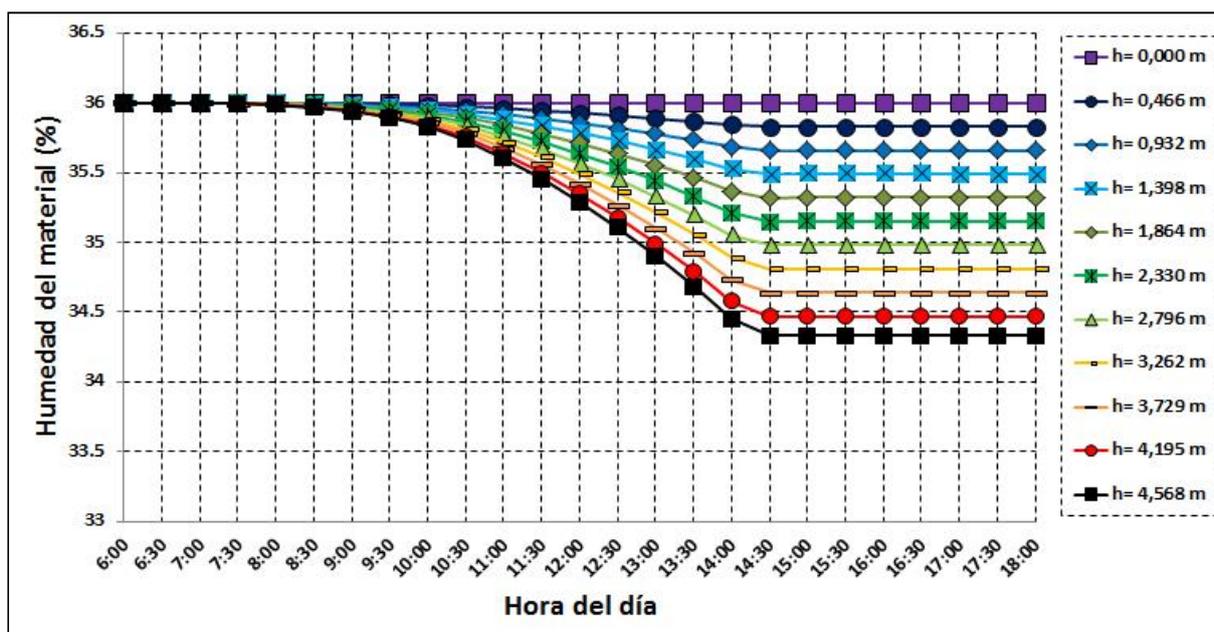


Figura 4. Distribución de humedad de las lateritas en el talud Este (pila con superficie de secado inclinada en  $60^\circ$ , respecto al plano horizontal).

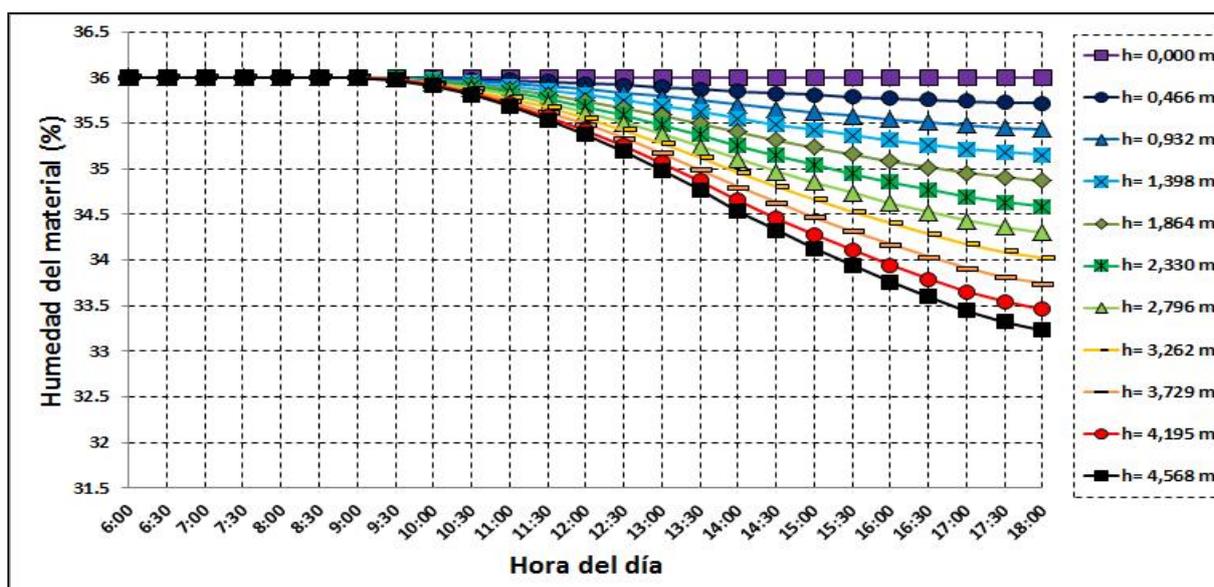


Figura 5. Distribución de humedad de las lateritas en el talud Oeste (pila con superficie de secado inclinada en  $60^\circ$ , respecto al plano horizontal).

Este último valor sugiere que para reducir la humedad entre 4,5 y 5 % en la pila completa, la misma debe ser sometida al proceso de secado natural por un periodo de 10 a 11 días, si las condiciones meteorológicas se mantienen similares a las utilizadas en la simulación computacional. De lo contrario puede que se requiera más o menos tiempo, según sea el caso, para lograr los mismos niveles de reducción de humedad en el material. Resultados similares a los expuestos en este epígrafe han sido obtenidos en la implementación práctica del proceso estudiado y en pruebas experimentales de secado natural reportadas [5, 6, 9-12, 16].

En las Figuras 6 y 7 se graficaron los valores de humedad obtenidos para los diferentes espesores de secado. Al analizar detalladamente dichas figuras se aprecia que se obtienen reducciones en la humedad de la mena laterítica que resultan significativas para el proceso (mayor de 1,5 y 2,5 %, según el talud del que se trate), hasta las capas que se encuentran a una distancia de 46,7 cm de la superficie en los taludes Este y Oeste.

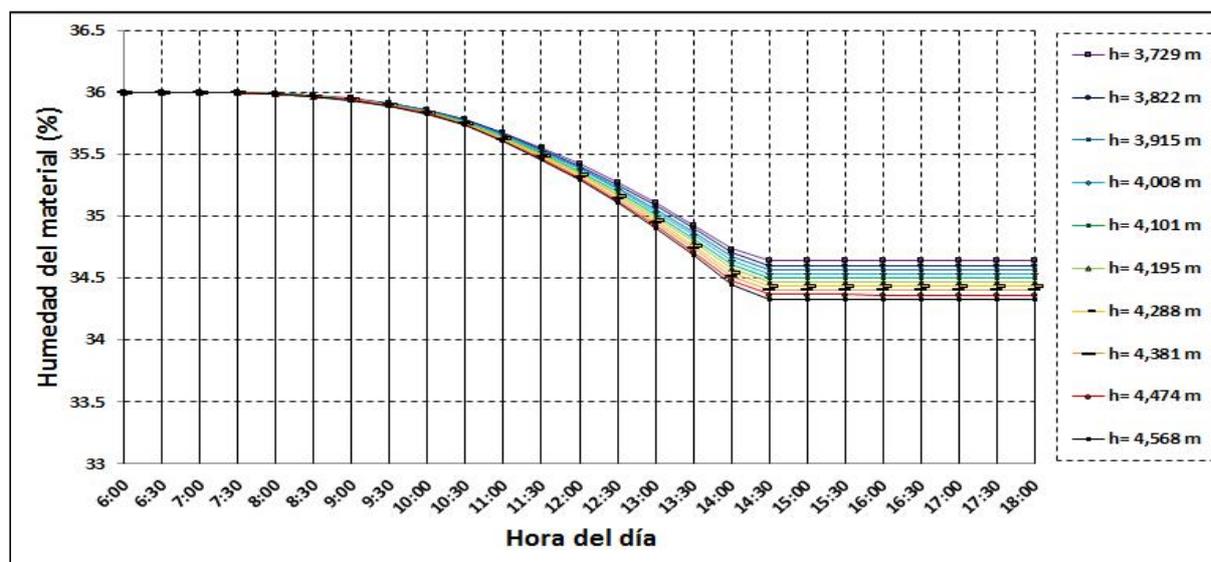


Figura 6. Distribución de humedad de las lateritas en el talud Este, en función del espesor de secado (pila con superficie de secado inclinada en 60°, respecto al plano horizontal).

De los resultados anteriores se infiere que, durante el proceso de secado natural de las lateritas, el transporte de la humedad se produce por los efectos combinados de los gradientes de temperatura y de humedad. El primero (el gradiente de temperatura) actúa, fundamentalmente, en las capas cercanas a la superficie de secado de las pilas como resultado del calentamiento que experimenta el material en esa zona. El segundo (el gradiente de humedad) actúa en las capas interiores de las pilas como consecuencia de la diferencia de concentración de humedad existente entre las diferentes zonas de las pilas.

Estos comportamientos sugieren que durante el proceso de secado solar natural el mecanismo de transporte de la humedad es mixto e incluye los efectos combinados de la difusión de vapor, debido a los gradientes de presión parcial del vapor; la difusión líquida, por los gradientes de concentración de humedad y el movimiento de líquido, provocado por la acción de las fuerzas capilares y gravitatoria.

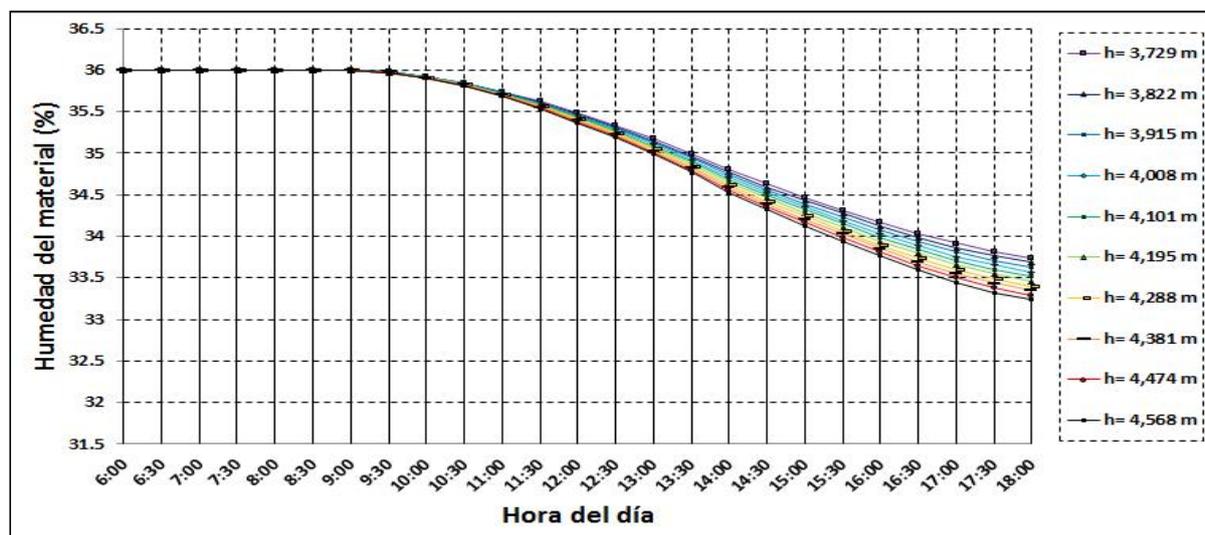


Figura 7. Distribución de humedad de las lateritas en el talud Oeste, en función del espesor de secado (pila con superficie de secado inclinada en 60°, respecto al plano horizontal).

### Simulaciones de la distribución de humedad en otras pilas de interés

Para determinar el comportamiento en pilas de diferentes inclinaciones de las superficies de secado se calculó y simuló la distribución de humedad para los ángulos de 30; 45 y 75 grados sexagesimales. Los comportamientos evidenciaron que las tendencias generales son similares a las descritas anteriormente. Sin embargo, en las pilas inclinadas a 30 y 75° se obtiene la mayor y la menor reducción en el contenido de humedad, por ese orden, debido a la influencia de los espesores de secado (Tabla 3).

Tabla 3. Reducción del contenido de humedad del material, respecto al valor inicial (36 %).

Talud	Inclinación de las superficies de secado (grados sexagesimales)				Unidad
	30°	45°	60°	75°	
Este	1,020	0,634	0,410	0,319	%
Oeste	1,055	0,698	0,490	0,375	
<b>La Pila</b>	<b>1,037</b>	<b>0,666</b>	<b>0,450</b>	<b>0,347</b>	

Estos comportamientos son lógicos porque en la sección de la tarde (a partir de las 12 horas) la radiación solar fue más intensa que en la mañana [ver valores promedios de  $I(\varphi, \psi)$  en Tabla 2] y, en consecuencia, el secado en el talud Oeste de la pila es más rápido que en el Este. Por tanto, el proceso de remoción y remonte del material debe realizarse en el sentido Este-Oeste. Lo anterior es congruente con el procedimiento de remoción propuesto por Estenoz [29], el cual tiene como objetivo desarrollar un método que posibilite aprovechar al máximo las energías solar y eólica en el proceso de secado natural para obtener una elevada productividad del secado por unidad de superficie.

A pesar de los comportamientos antes descritos para las pilas de lateritas de sección transversal triangulares, lo cuales pueden considerarse satisfactorios, estudios previos han evidenciado que las menas lateríticas al ser depositadas a granel pueden adoptar otras configuraciones geométricas: semi-elípticas; hiperbólicas y parabólicas [14, 37, 38]. Los próximos trabajos de este colectivo científico estarán dedicados a evaluar la incidencia que tiene la forma de la sección transversal de las pilas en la captación de la energía solar y eólica que llega a la superficie de secado y su impacto en la eficiencia energética del proceso de secado solar natural. Este es un tema interesante que no ha sido suficientemente estudiado.

#### **4. CONCLUSIONES**

- ✓ Las simulaciones computacionales, realizadas con pilas de lateritas expuestas a secado eólico y solar, evidenciaron que se redujo el contenido de humedad del material en los taludes Este y Oeste, siendo más intenso el secado en el segundo. En las pilas triangulares con superficies inclinadas en 30 y 75 grados, respecto al plano horizontal, la humedad disminuyó un 1,04 y 0,35 % en 12 horas de secado.
- ✓ En el proceso de secado eólico y solar de las lateritas depositadas en pilas predomina un mecanismo mixto de transporte de la humedad, que incluye los efectos combinados de la difusión de vapor, la difusión líquida y el movimiento de líquido. Lo anterior se debe, fundamentalmente, a la acción simultánea de los gradientes de temperatura y concentración de humedad, y de las fuerzas capilares y gravitatoria que actúan sobre la columna de líquido presente en las pilas de minerales.
- ✓ En la aplicación práctica del secado eólico y solar de las lateritas deben considerarse, simultáneamente, el volumen de material expuesto a secado, la superficie horizontal disponible y la geometría de la sección transversal de las pilas, debido a que estos parámetros condicionan la eficiencia energética del proceso de secado natural. Para

condiciones de implementación similares a las simuladas, se recomienda el uso de pilas con superficies de secado inclinadas entre 45 y 60 grados, respecto a la horizontal.

## **5. REFERENCIAS**

- [1]. Vinardell, J. *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de Maestría. ISMMM. 2011. 63 h.
- [2]. Retirado-Mediaceja, Y.; Laurencio-Alfonso, H.; Salazar-Corrales, M.; León-Segovia, M.; León-Segovia, M.; Falconí-Borja, M.; Vega-Peñañiel, J. Perfeccionamiento de la tecnología de secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología*, 2018, 34(2): 195-209. Consultado: 21 mayo 2025. Disponible en: [https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art6\\_No2\\_2018](https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art6_No2_2018).
- [3]. Retirado, Y. *Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas*. Tesis Doctoral. ISMMM. 2012. 121h.
- [4]. Espinosa, M.; N. Pérez. Resultados obtenidos en pruebas de secado solar realizadas por el CEDINIQ a la empresa Ernesto Che Guevara. *Informe de investigación*, 2010. 20 p.
- [5]. Estenoz S.; A. Arderí; N. Batista; A. Donatién. Resultados en la industria minera del secado solar y la homogeneización de minerales en pilas a la intemperie. En: *Memorias en CD del Evento CIEMA'05*. Santiago de Cuba. 2005.
- [6]. Estenoz, S.; A. Mejías; A. Donatién; A. Arderí. Evaluación de las tecnologías de explotación de depósitos mineros para mezclas, beneficio, homogeneización y secado solar en la empresa Ernesto Che Guevara. *Informe Técnico*, 2007a. 46 p.
- [7]. Estenoz, S.; A. Arderí; A. Reyes; Y. Lobaina; H. Pinto. 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. 2007b.
- [8]. Estenoz, S.; A. Arderí; 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. 2007c.
- [9]. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; A. Rojas. Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico. *Minería y Geología*, 2007, 23(3): 1-19. Consultado: 3 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [10]. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres. Cinética del secado solar del mineral laterítico empleado en la industria del níquel en Moa. En: *5to Taller Internacional de*

*Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos. 2008, ISBN: 978-959-257-186-0.

- [11]. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; N. Hernández. Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. *Minería y Geología*, 2009, 25(1): 1-11. Consultado: 19 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [12]. Retirado, Y. Estudio experimental del secado solar de las lateritas empleadas en la industria del níquel. En: *Forum tecnológico especial de energía*. Moa. 2010, ISBN: 978-959-16-1216-8.
- [13]. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres. Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería y Geología*, 2011, 27(1): 1-21. Consultado: 27 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [14]. 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: 15 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [15]. 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: 2 mayo 2025. Disponible en: <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci>.
- [16]. Retirado, Y.; A. Legrá; M. Lamorú; E. Torres; H. Laurencio & E. Góngora. Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología*, 2012, 28(4): 1-19. Consultado: 11 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [17]. Ferro, V.; S. Fonseca; J. Abdala; A. Torres. Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos cinéticos (Parte I). *Tecnología Química*, 1999, 19(3): 18-25.
- [18]. Ferro; V.; J. Abdala; S. Fonseca; J. Pantoja; A. Torres; C. Bergues; P. Griñán; G. Ibáñez. Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos energéticos, de rendimiento y económicos (Parte II). *Tecnología Química*, 2000, 20(1): 52-57.
- [19]. Abdala, J.; S. Fonseca; J. Pantoja; A. Torres. Secado de café en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio. *Tecnología Química*, 2003, 23(3): 68-79.
- [20]. Fonseca, S.; J. Abdala; V. Ferro; J. Pantoja; A. Torres. Estudio comparativo del secado solar de café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología Química*, 2003, 23(3): 48-54.
- [21]. Fonseca, S.; J. Abdala; A. Torres; J. Pantoja. Análisis térmico del secador solar de

- tambor rotatorio para granos. *Tecnología Química*, 2000, 20(3): 70-75.
- [22]. Fonseca, S.; C. Bergues; J. Abdala; P. Griñán; G. Hernández. Estudio de la cinética del secado de granos en el prototipo de secador solar. Análisis de los resultados. *Tecnología Química*, 2002, 22(2): 59-64.
- [23]. Bergues, C.; P. Griñán; S. Fonseca; J. Abdala; G. Hernández. Construcción y evaluación del secador solar de granos a escala industrial de 3m<sup>2</sup> en condiciones de explotación. *Tecnología Química*, 2002, 22(3): 87-91.
- [24]. Bergues, C.; P. Griñán; J. Abdala; S. Fonseca. Concepción y pruebas de un secador solar de plantas medicinales con cubierta de polietileno. Una experiencia cubana. En: *Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Santiago de Cuba. 2003b.
- [25]. Griñán. P.; S. Fonseca. *La madera y el secado solar*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 2003.
- [26]. Pacheco, P; J. Suárez; E. Juliá. Secado solar de maderas. Perspectiva teórica. *Tecnología Química*, 2006, 26(3): 71-75.
- [27]. Bergues, C.; O. Fabar; A. Martínez. Minisecador solar para la agricultura urbana “MINISOL”. Concepción, evaluación y caracterización de sus cambios tecnológicos. *Tecnología Química*, 2006, 26(2): 37-48.
- [28]. Leyva, A.; A. Díaz; O. Leyva; J. Trotman. Etapa preliminar del secado solar del Carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas. *Informe de investigación*, 2010. 10 p.
- [29]. 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.
- [30]. Fuentes, O.; Estenoz-Mejía, S. Comportamiento del secado solar de lateritas a la intemperie en condiciones de clima húmedo tropical. *Holos*, 2020, 1(3): 1-13. doi: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.7011>.
- [31]. Hernández, J.; P. Quinto. Secado de medios porosos: Situación actual y perspectivas. En: VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México DF. Noviembre, 2003.
- [32]. Hernández, J.; P. Quinto. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*, 2005, 9(2): 63 - 71.
- [33]. Likov A. Application of irreversible thermodynamic methods to investigation of heat and mass transfer. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1966, 9(1): 139-152.

- [34]. Likov, A. Teoría del secado. 2 ed. Moscú: Editorial Energía, 1968.
- [35]. Estenoz, S.; N. Pérez; I. Ramírez. Secado solar y homogeneización de minerales a la intemperie en la industria cubana del níquel. En: *Memorias del evento CUBASOLAR*. Villa Clara. 2006.
- [36]. 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: 4 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [37]. 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*, 2010, 26(3): 1-22. Consultado: 23 mayo 2025. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
- [38]. Retirado-Mediaceja, Y.; A. A. Legrá-Lobaina; M. A. Leyva-Tarafa; M. Lamorú-Urgelles; M. L. Pérez-Lamorú. Aplicación informática para calcular área y volumen de pilas de tierra mineral almacenadas a granel. *Revista Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, 2024, 8(1), pp. 36-47. Consultado: 31 mayo 2025. Disponible en: <http://investigacion.utc.edu.ec/index.php/ciya/article/view/622/851>
- [39]. Aldana, E.; I. Ramírez; H. Alepuz. Determinación de la carga y capacidad actuales de la instalación de secado de mineral de la empresa Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 2004, 24(2): 90 - 96.