



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“ Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ ”

FACULTAD DE METALÚRGIA – ELECTROMECHANICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

IMPLEMENTACIÓN DEL SECADO SOLAR NATURAL EN LA EMPRESA RENÉ RAMOS LATOUR

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

RUBÉN MEDINA FONSECA

Moa: 2013



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“ Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ ”

FACULTAD DE METALÚRGIA – ELECTROMECAICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

IMPLEMENTACIÓN DEL SECADO SOLAR NATURAL EN LA EMPRESA RENÉ RAMOS LATOUR

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Autor: RUBÉN MEDINA FONSECA

Tutores: M.Sc Ing Xiomara Añel Rodríguez

M.Sc Ing Yaritza Ramirez Cruz

Moa: 2013

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Rubén Medina Fonseca**, autor de este trabajo y mis tutores, la MSc Ing. Xiomara Añel Rodríguez y la MSc Ing Yaritza Ramirez Cruz, declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Departamento de Metalúrgica – Química del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Rubén Medina Fonseca

MSc. Ing Xiomara Añel Rodríguez

MSc. Ing. Yaritza Ramirez Cruz

PENSAMIENTOS

..... '' de lo que se trata no es de interpretar el mundo; sino de transformarlo''.

Marx

..... '' Se alcanza el éxito convirtiendo cada paso en una meta y cada meta en un paso ''

C.C.Cortés.

DEDICATORIA

Cuando se desea dedicar algo, siempre se piensa en las personas más apegada a uno, en aquel que siempre te estuvo observando, aconsejando, brindándote momentos que se quedan plasmados para siempre en la memoria. Por esto yo les dedico este trabajo:

A la Revolución Cubana y a nuestro querido Fidel Castro Ruz por haberme dado la oportunidad de superarme.

A mi madre (Ángela Rosa Fonseca), quien ha sido el motor impulsor para que yo siguiera hasta el final.

A mi esposa (Dariulys Núñez Sánchez) por su inestimable ayuda y comprensión

A mis hijos (Maday, Michel, Mabdiel y al pequeñito Diogo), todos son el amor de mi vida.

A todas aquellas personas que me extendieron su mano y parte de su tiempo.

A todos “les dedico este éxito”

El autor

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud profunda a los que me han ayudado durante estos años de estudios y a llevar a cabo este trabajo. Su dedicación e incansable esfuerzo me han ayudado mucho para enfrentar la vida.

Agradecimientos especiales a:

- *Mi tutor: M. Sc. Xiomara Añel Rodríguez y a el Ing. Crispín Sánchez Guillén por las ayudas prestadas en todo momento.*
- *A mi tutora Yaritza Ramirez Cruz , por la ayuda y orientación brindada*
- *En fin a nuestra revolución por haberme dado la oportunidad de estudiar desde mi infancia hasta la actualidad.*

A todos “Muchas Gracias”

**El
autor**

RESUMEN

El presente trabajo propone un estudio del comportamiento de la humedad del mineral que se alimenta a los secaderos de la empresa “Cmdte. René Ramos Latour” a partir de la extracción del 100 % de la materia prima de la Mina de Pinares. Este proceso comenzó aplicarse en el año 2006 y produjo un incremento de la humedad del mineral en un 5 %, incidiendo considerablemente en el proceso de secado e incrementando el consumo de petróleo. Se realiza un análisis de los factores fundamentales que hay que tener en cuenta para el secado solar, se proponen alternativas de solución que permitan disminuir la humedad y el consumo de combustible, se efectúa un estudio estadístico como base para determinar el consumo de petróleo en secaderos a partir de la humedad de entrada del mineral y finalmente se realiza el análisis económico que demuestra la factibilidad económica de la implementación del secado solar natural para el material analizado. Los resultados mostraron que en los primeros seis meses existe un ahorro de 1348 toneladas de petróleo, incrementando la productividad de la planta de secaderos de 38,4 a 50,25 t/h. La evaluación ambiental arrojó que las afectaciones medioambientales más importantes son las emisiones de polvo y los gases producto de la combustión.

ABSTRACT

This work studies the behavior of mineral moisture that feeds the dryers of the company "Cmdr. René Ramos Latour "from 100% extraction of the raw material of Pinares Mine. Applied this process began in 2006 and was an increase in humidity by 5% mineral, greatly influencing the drying process and increasing the oil consumption. An analysis of the key factors to be taken into account for the solar drying, alternative solutions are proposed to allow moisture and reduce fuel consumption, a statistical study is performed as a basis for determining oil consumption in drying moisture from the input and finally mineral economic analysis is performed which demonstrates the economic feasibility of the implementation of natural solar drying the material analyzed. The results showed that in the first six months there is a saving of 1348 t of oil, increasing the productivity of the plant drying of 38.4 to 50.25 t / h. The environmental assessment showed that the major environmental damages are dust emissions and combustion product gases.

<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>1 MARCO TEORICO</u>	5
<u>1.1 Introducción</u>	5
<u>1.2 Proceso metalúrgico de producción de níquel</u>	5
<u>1.3 Trabajos relacionados con el secado solar en Cuba</u>	6
<u>1.3.1 Trabajos relacionados con el secado de las menas lateríticas</u>	9
<u>1.4 Principios técnicos del secado</u>	11
<u>1.5 Generalidades del proceso de secado solar natural</u>	13
<u>1.5.1 Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado</u>	15
<u>1.5.2 Formas de enlace de la humedad con el material</u>	16
<u>1.5.3 Movimiento de la humedad dentro del mineral laterítico</u>	17
<u>1.5.4 Mecanismo de secado. Transferencia de calor y masa</u>	18
<u>1.5.5 Factores que intervienen en el proceso de secado solar</u>	19
<u>1.6 Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural</u>	20
<u>1.6.1 Características que debe cumplir el patio para el secado solar</u>	21
<u>1.7 Características climatológicas del Yacimiento</u>	22
<u>1.8 Conclusiones del Capítulo</u>	24
<u>2 MATERIALES Y MÉTODOS</u>	25
<u>2.1 Introducción</u>	25
<u>2.2 Materiales empleados en la experimentación</u>	25
<u>2.3 Proceso de transporte del material a la industria</u>	27
<u>2.4 Período de investigación y medidas tomadas para mejorar el comportamiento del proceso</u>	29
<u>2.5 Método para el cálculo del área de transferencia de calor y masa de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural</u>	32
<u>2.6 Diseño de experimentos</u>	35
<u>2.6.1 Instalación experimental para el estudio de la humedad</u>	35
<u>2.6.2 Selección de las variables</u>	35
<u>2.6.3 Masa de mineral a secar</u>	36
<u>2.6.4 Humedad inicial del mineral</u>	36
<u>2.6.5 Granulometría</u>	37
<u>2.6.6 Humedad final del mineral</u>	37
<u>2.6.7 Secado solar en el depósito de hormigón cerca de la Industria</u>	38
<u>2.7 Número de corridas experimentales</u>	38

<u>2.7.1 Técnica experimental para la prueba de humedad</u>	38
<u>2.8 Estado actual de la adherencia del mineral en la empresa René Ramos Latour</u>	40
<u>2.9 Comportamiento de la humedad del mineral a la entrada de la industria</u>	40
<u>2.10 Conclusiones del capítulo</u>	42
<u>3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL</u>	43
<u>3.1 Introducción</u>	43
<u>3.2 Resultados experimentales</u>	43
<u>3.2.1 Humedad del mineral laterítico durante el secado solar</u>	43
<u>3.2.2 Granulometría</u>	44
<u>3.2.3 Densidad real y composición química del mineral</u>	46
<u>3.2.4 Secado de mineral en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior</u>	47
<u>3.2.5 Temperaturas a bulbo seco y húmedo</u>	48
<u>3.3 Análisis de los resultados obtenidos en la implementación del secado solar del mineral a escala piloto</u>	50
<u>3.3.1 Comportamiento de la humedad del mineral laterítico</u>	50
<u>3.4 Otros ensayos de secado solar en pilas de diferentes masas y dimensiones</u>	51
<u>3.4.1 Determinación de la adherencia</u>	53
<u>3.5 Análisis de los impactos asociados a la implementación del secado solar natural del mineral laterítico a escala industrial</u>	
<u>3.5.1 Impactos económicos</u>	56
<u>3.5.2 Impactos sociales</u>	57
<u>3.5.3 Impactos ambientales</u>	58
<u>3.6 Resumen de los beneficios derivados de la implementación del secado solar natural del mineral laterítico en la empresa René Ramos Latour de Nicaro</u>	58
<u>3.6.1 Influencia del secado solar en el consumo de combustible</u>	58
<u>3.6.2 Influencia en la productividad de los secaderos</u>	62
<u>3.7 Conclusiones del capítulo</u>	65
<u>CONCLUSIONES GENERALES</u>	66
<u>RECOMENDACIONES</u>	67
<u>Bibliografía</u>	
<u>Anexos</u>	

INTRODUCCIÓN

En la zona nordeste oriental, en la provincia de Holguín se encuentra la mayor reserva de níquel de todo el país. Este mineral constituye uno de los rublos más importantes de la economía cubana; el cual es procesado para la obtención de un concentrado de níquel más cobalto. Existen dos tecnologías para obtener el producto, la tecnología carbonato amoniacal y lixiviación acida la primera aplicada en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” y “Cmdte. René Ramos Latour” pionera del níquel cubano y que se encuentra en el poblado de Nicaro Municipio Mayari y la segunda en la “Cmdte Pedro Soto Alba de Moa.

Un elemento que puede mejorar el comportamiento energético irracional de las empresas del níquel, representa la aplicación de soluciones integradoras y sustentadas en métodos científicos que permitan determinar las causas de los problemas y establecer las bases para una gestión energética más eficiente.

Por razones económicas, ambientales y políticas, es necesario buscar otras fuentes alternativas de energía que sean a la vez rentables, abundantes, limpias y que preserven el equilibrio ecológico.

La implementación de secado solar en la industria minera representa un considerable ahorro de energía y la reducción ostensible de las emanaciones de gases tóxicos y aerosoles a la atmósfera.

En la Empresa René Ramos Latour el índice de consumo de petróleo en lo fundamental se ha visto afectado por la disminución de las capacidades productivas derivadas de diferentes causas tecnológicas. La inestabilidad del

proceso productivo no solo se manifiesta en las plantas, ha incidido además el cambio de la mina Martí por agotamiento minero para la mina Pinares de la cual se extrae el 100 % de la materia prima. Este cambio de mina se produjo en el año 2006 y unas de las variables que acompaña al mineral es la humedad, la cual se ha incrementado en aproximadamente un 5 % provocado por las características hidrogeológicas de los yacimientos niquelíferos, lo que genera:

- La adherencia de una cantidad importante (3-5%) de materia prima mineral húmeda en los medios de transporte y tupiciones en las tolvas de alimentación.
- El transporte de una cantidad considerable de agua en la materia prima mineral lo que provoca la necesidad de aumentar el volumen de carga para garantizar el plan de producción.
- El excesivo consumo de combustible en el proceso de secado (34-36 kg de petróleo por tonelada de materia prima mineral procesada).
- Inestabilidad de los parámetros y variables del proceso, incidiendo en la calidad del producto final de la planta de secaderos y a la vez en la productividad y la eficiencia, lo que conlleva a un alto consumo de petróleo.

Actualmente en la Empresa Comandante René Ramos Latour el mineral que se somete a operación proviene de Pinares de Mayarí tiene una humedad que está por encima de 33 %, por lo tanto el consumo específico de fuel oil se ha incrementado a valores superiores de 30.0 kg por tonelada de mineral seco y una de las vías de reducir este consumo es la disminución de la humedad de entrada del mineral proponiendo que se realice mediante el aprovechamiento de la energía solar.

A partir de los aspectos antes expuestos se declara como situación ***problemática:***

El elevado consumo de combustible en el proceso de secado térmico del mineral laterítico en los secaderos convencionales de la Empresa

Comandante René Ramos Latour, provocado por el alto contenido de humedad del material alimentado.

Problema a investigar:

El insuficiente conocimiento de la influencia que tiene el secado solar natural del mineral laterítico en la reducción del contenido de humedad del material y en el consumo de petróleo durante el secado térmico convencional en la Empresa René Ramos Latour.

Como ***Objeto de estudio de la investigación*** se plantea:

El proceso de secado solar natural del mineral laterítico desarrollado en la Empresa Rene Ramos Latour de Nicaro.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente ***Hipótesis:***

El estudio teórico del secado solar natural, conjugado con la implementación a escala piloto e industrial del proceso con minerales lateríticos, permitirá conocer la influencia que tiene en el proceso la reducción del contenido de humedad del material en el consumo de petróleo durante el secado térmico convencional en la Empresa Comandante Rene Ramos Latour.

Objetivo General:

Determinar la influencia que tiene el secado solar natural en la reducción del contenido de humedad del mineral laterítico y en el consumo de petróleo durante el secado térmico convencional del mineral.

Objetivos específicos:

- Realizar el estudio experimental del proceso de secado solar natural del mineral laterítico a escala piloto.
- Analizar los impactos derivados de la implementación, a escala industrial, del proceso objeto de estudio en la empresa René Ramos Latour.

Campo de acción:

La reducción del contenido de humedad del mineral laterítico expuesto a secado solar

Para lograr el cumplimiento de objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo:**

- ✓ Análisis bibliográfico sobre el proceso de secado, que permita el establecimiento y conocimiento del estado actual de las investigaciones realizadas sobre el tema.
- ✓ Implementación del secado solar natural del mineral laterítico en la empresa René Ramos Latour.
- ✓ Comparación del consumo de combustible asociado al secado térmico en los cilindros rotatorios de las empresas antes y después de implementado el secado solar del mineral.
- ✓ Valoración técnico-económica del proceso y afectaciones medioambientales asociadas al mismo.

Metodología de la investigación

- Método **histórico-lógico** para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- Método **inductivo-deductivo** para el establecimiento de las limitaciones de las investigaciones precedentes desarrolladas en el mundo para el secado de materiales, al ser aplicadas al mineral laterítico.
- Método de **investigación experimental** para describir y caracterizar el proceso estudiado y sus principales regularidades.
- **Técnicas computacionales** para el establecimiento de los gráficos de comportamiento relacionados con el proceso.

1 MARCO TEORICO

1.1 Introducción

La planta de secaderos tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel y un eslabón importante lo constituye el secado del mineral logrando reducir la humedad de entrada, para la disminución de los consumos de combustible. En los últimos años, la escasez y elevados precios de estos han despertado un nuevo interés en el secado con el uso de la energía solar. En el presente capítulo se realiza un análisis de los principales trabajos realizados a través de los años en la empresa y diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada referente al secado solar, los cuales se han llevado a cabo en investigaciones anteriores con el objetivo de disponer de elementos básicos y tendencias actuales, que resultan esenciales para el desarrollo del trabajo.

El **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos técnicos necesarios para el estudio experimental del proceso de secado solar del mineral laterítico, y analizar los trabajos precedentes mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.2 Proceso metalúrgico de producción de níquel

El procesamiento de la materia prima mineral después de extraída de la mina se somete a un proceso carbonato amoniacal con el objetivo de extraer el Ni y Co para obtener el Sínter de Ni como producto final. El esquema de lixiviación carbonato- amoniacal del mineral reducido o proceso Carón ha sido estudiado y puesto en la práctica durante muchos años en Cuba, ha

funcionado según dicho esquema con resultados satisfactorios en la empresa fundada en los años de la segunda guerra mundial.

Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosféricas. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentinitos procedente de minas Pinares de Mayarí, mientras que otro esquema por ejemplo el utilizado en la “Cmdte Pedro Soto Alba” de Moa está basado en la lixiviación ácida permitiendo la separación de la parte laterítica.

El producto final de la planta de Recuperación y Sinter en forma de óxido y polvillo es un producto estable de exportación en el mercado mundial y el consumo nacional.

El área incluye las plantas y departamentos siguientes: planta de preparación de minerales, hornos de reducción, lixiviación y cobalto, recuperación y sinter, planta eléctrica además el departamento de tecnología, que incluye: grupo técnico, laboratorio, y control de la calidad.

El objetivo del secado solar es reducir el contenido de humedad de un material, bajo condiciones ambientales, este proceso es lento pero en los últimos años, la escasez de recursos, los elevados precios del combustible y la creciente preocupación por el medio ambiente a suscitado un nuevo interés en el secado basado en la energía solar, tratando de desarrollar técnicas y dispositivos que permitan resolver los problemas mencionados.

1.3 Trabajos relacionados con el secado solar en Cuba

Ferro et al. (1999) realizan el análisis cinético del secado de café en diferentes instalaciones solares y demuestran que a pesar de las diferencias observadas entre las instalaciones solares evaluadas, el proceso de secado del café sigue esencialmente el mismo mecanismo cinético. Posteriormente

Ferro et al. (2000) reportan los rendimientos térmicos de los diferentes secadores solares ensayados para el secado de café y realizan además un análisis energético y económico del proceso de secado del mencionado material. Para validar las propuestas tecnológicas solares comparan los resultados económicos del secado en las mismas, con los del proceso en secadores convencionales.

Fonseca et al. (2000) proponen la implementación de un secador de granos tipo tambor estableciendo una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas. En el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) fue construido el secador y analizado térmicamente. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas que permite pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos.

Fonseca et al. (2002) presentan los resultados de las pruebas cinéticas de un secador solar con cubiertas de polietileno. Se experimentó con semillas de Maíz, Soya y Calabaza, obteniéndose resultados satisfactorios. De estas pruebas se pudo determinar que el secado de $3 \text{ kg/m}^2\text{día}$ de semillas en estos secadores es una solución alternativa económicamente viable para el secado de semillas en Cuba.

Bergues et al. (2002) muestran los resultados de las pruebas de un prototipo de secador solar de semillas con cubierta de polietileno negro con una superficie de 3 m^2 . También exponen los índices de funcionamiento y el comportamiento económico comparativo con un secador eléctrico convencional. Un año después estos investigadores (Bergues et al., 2003) realizan la evaluación térmica para tres variantes de un secador solar de bajo costo y determinan la variante más adecuada para el secado de semillas.

Griñán y Fonseca (2003) exponen aspectos técnicos del secado elaborados a partir de las experiencias de los autores obtenidas durante reiteradas prácticas de secado en un secador solar de madera de 12 m^3 construido en el CIES y confeccionan una metodología que permite la aplicación de la

tecnología solar para el secado de madera y otros materiales con características similares a los ensayos por estos investigadores.

Fonseca et al. (2003) analizan la factibilidad técnica y económica del secado solar de café pergamino en plazoletas de hormigón ennegrecidas y presentan de forma comparativa el estudio de la cinética del secado y la valoración económica del efecto de la plazoleta ennegrecida respecto a las convencionales.

Abdala et al. (2003) presentan los resultados experimentales de ensayos de secado de café en dos tipos de secadores solares: multipropósito y de tambor rotatorio, estudian la cinética del secado para diferentes niveles de carga, desde una humedad inicial igual a 50 % hasta una humedad final de 12 %, además comprobaron la calidad de las muestras secadas.

Bergues et al. (2006) describen y evalúan térmicamente un prototipo de secador solar adecuado para la agricultura urbana, concluyendo que los parámetros térmicos resultan apropiados para el secado de productos varios.

Pacheco et al. (2006) modelan el secado solar de madera y valoran la importancia que tiene determinar los perfiles de temperatura en muestras de madera sometidas al secado. Finalmente proponen la conducción transitoria del calor como el modo predominante en el proceso de secado y los modelos de Fourier-Kirchhoff y de Grever-Likov como solución.

Leyva et al. (2010) estudian el secado solar a la intemperie del Carbón mineral y verifican que la implementación del proceso provoca la reducción del contenido de humedad del material entre 8 y 13 %, lo cual genera el aumento de la eficiencia del secado convencional en el proceso productivo y la disminución de las emisiones de gases tóxicos.

Al analizar los trabajos relacionados con el secado solar se aprecia que varios de ellos están destinados a la modelación matemática del proceso, pero en Cuba predomina la tendencia a realizar balances térmicos a los secaderos, lo anterior conjugado con el hecho de que se estudian materiales diferentes al analizado en el presente trabajo permite concluir que las

investigaciones consultadas no dan solución al problema planteado, por tanto se procede al estudio de los trabajos concernientes a las menas lateríticas.

1.3.1 Trabajos relacionados con el secado de las menas lateríticas

Miranda (1996) destaca la aplicación del método de reflexión neutrónica, para determinar la humedad de las distintas menas de los yacimientos lateríticos arrojando divergencias significativas respecto al método tradicional de diferencias de pesadas, por este motivo realizó análisis termogravimétricos, los cuales revelaron la existencias de fenómenos de descomposición de fases de minerales que no habían tenido tratamiento térmico previo.

Torres (1999) y Torres et al. (2000) investigan el comportamiento del arrastre de partículas finas en los gases durante el secado de las menas lateríticas en uno de los secadores rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara en condiciones normales de operación, en otro secadero eliminaron los levantadores sectoriales en el último tercio del equipo y analizaron en ambos la influencia de los gases residuales provenientes de la planta Hornos de Reducción, luego obtienen la correlación entre la velocidad de los gases en el interior del cilindro, el contenido de humedad de los gases y el arrastre de partículas.

Torres et al. (2003) determinan la influencia que tienen la humedad de equilibrio, la constante de secado y el coeficiente de transferencia de masa, en el secado de las menas lateríticas en los secadores rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara, obtienen la correlación y regresión de las variables antes mencionadas en función de la temperatura y el contenido de humedad de las menas.

Estenoz y Espinosa (2003) exponen una valoración socio-económica y técnica de la implementación del secado solar natural y la homogenización en la explotación de menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara. Destacándose que con la aplicación del proceso en la referida empresa se puede disminuir hasta el 24 % la humedad inicial de las menas, la cual en la actualidad es superior al 34 %, lo que generaría ahorros entre 14 y 17

millones de dólares anuales aproximadamente por la disminución de los consumos específicos de combustible y energía eléctrica durante el secado térmico convencional de las menas.

Aldana et al. (2004) analizan los problemas que limitan la productividad de los secaderos de menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara, demostrando que la limitante fundamental es el aporte de calor y que se puede elevar la productividad a través del incremento del coeficiente de utilización de los secaderos y la disminución de la humedad usando el secado solar previo de las menas, aspecto al que se han referido otros investigadores (Estenoz , 2001; Estenoz y Pérez, 2001; Retirado, 2007).

Estenoz et al. (2005) refieren que en Brasil la empresa Tocantín S.A maneja 2,4 millones de toneladas de minerales lateríticos en depósitos mineros de secado solar, para reducir la humedad del material en 4 % y elevar la homogenización de los flujos de salida de las minas a 75-78 grados. También expone que en Filipina la empresa Río Tuba Co trasiega en sus depósitos de secado solar alrededor de 2,9 millones de toneladas de minerales para reducir la humedad de entrega en 14 %, elevar los niveles de homogenización del mineral hasta 88-91 grados y ahorrar 9 millones de dólares por concepto de ahorro de petróleo. Sin embargo, no se reportan estudios relacionados con la modelación matemática del proceso.

Estenoz et al. (2006) realizan el diseño de una instalación de secado multipropósito para mantener la sucesión y sincronización de las operaciones tecnológicas a través de un sistema compuesto de almacenado, clasificación, homogeneización, secado y estabilización de los flujos mínimos necesarios de los materiales iniciales para el abasto a la industria, de una mezcla homogénea durante un determinado período de tiempo, en el cual se ajusten las operaciones industriales necesarias para aumentar las ganancias específicas de la producción y reducir el impacto ambiental de la minería y la metalurgia.

Retirado et al. (2007) demuestran que con el secado solar natural solo es posible evaporar la humedad ligada mecánicamente a las menas debido a

los bajos regímenes de temperatura que se generan en el proceso, realizan los experimentos con menas lateríticas expuestas a secado solar natural y obtienen la velocidad de secado para las condiciones de intemperie. Otros resultados satisfactorios relacionados con el estudio experimental del proceso con menas lateríticas son reportados por diferentes investigadores (Santos, 2005; Ramírez, 2006; Romero, 2006; Retirado et al., 2008).

Estenoz (2009) muestra el efecto que tiene la preparación minera basada en el secado solar, la mezcla y homogeneización en depósitos mineros a la intemperie, en el aumento de la producción de Ni + Co y las utilidades económicas de las empresas niquelíferas cubanas.

Retirado et al. (2009) estudian el comportamiento de la adherencia en menas lateríticas expuestas a secado solar natural, estudiaron experimentalmente dos pilas expuestas a condiciones ambientales naturales, de los resultados obtenidos concluyen que la adherencia de las menas no está determinada solamente por el contenido de humedad, sino además por su granulometría y el ángulo de inclinación de la superficie de contacto.

Espinosa y Pérez (2010) evalúan la factibilidad técnica de la implementación del secado solar natural y la homogenización de las menas lateríticas pertenecientes a la empresa Ferroníquel Minera S.A. Al analizar la variación del contenido de humedad del material comprobaron que se redujo entre 4,92 y 10,13 %. De lo anterior se infiere que las potencialidades energéticas de la región permite la aplicación del proceso objeto de estudio a otros materiales con características similares a las menas lateríticas investigadas.

Diferentes investigaciones en los últimos años, han estado dirigidas a trabajos que abordan criterios sobre el secado del mineral desde el punto de vista científico, técnico y práctico.

1.4 Principios técnicos del secado

El secado del mineral está destinado a eliminar el exceso de humedad para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos

tecnológicos. Además disminuye la productividad del secadero y provoca un consumo innecesario de combustible.

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición química, mineralógica, contenido de humedad y tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad que se puede absorber depende, considerablemente de su temperatura, aunque también puede existir la absorción de agua a temperatura constante (Faires, 1991; Fernández, 1994). A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, la absorción de la humedad es mayor. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Zazhin, 1984).

De acuerdo con Boizán (1991) una de las formas más eficiente de describir el proceso de secado es mediante las curvas de velocidad de secado contra humedad promedio en un sistema de coordenadas $(du/d\tau)=f(u)$. En la figura 1.1 se representan de forma general las etapas de secado por la que transita un sólido sometido al proceso.

El tramo AB corresponde al período de calentamiento. En éste la temperatura del material se eleva hasta la temperatura a bulbo húmedo y su humedad baja muy poco. La velocidad de secado crece y en B alcanza su máximo valor.

El período de velocidad de secado constante (primer período) corresponde a la recta BC. En esta etapa tiene lugar una intensa evaporación de la humedad libre. La velocidad del proceso es máxima y depende fundamentalmente de la resistencia externa a la difusión y en menor cuantía de la resistencia interior del sólido a la difusión.

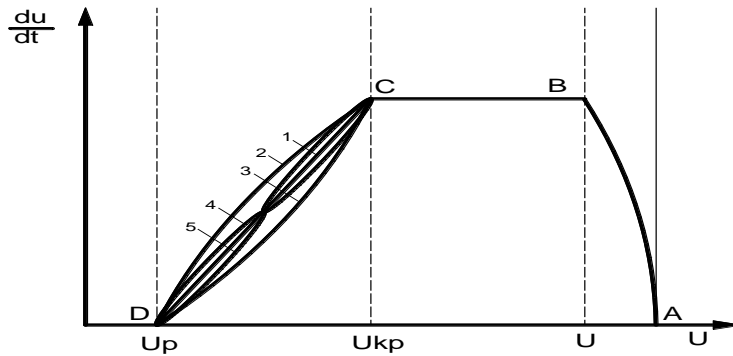


Figura 1.1 Curva de velocidad de secado.
Fuente: Boizán, 1991.

El período de velocidad de secado decreciente (segundo período), según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C hasta D.

A pesar de que en sentido general este es el comportamiento de los sólidos, en ocasiones durante el secado de algunos materiales (los cereales y diferentes vegetales como la papa, remolacha y la zanahoria) en el primer periodo su temperatura no se mantiene constante, sino que sigue creciendo hasta alcanzar valores superiores a la del bulbo húmedo. Este comportamiento permite concluir que la proposición realizada por Lykov (1968) de llamar a esta etapa **período de temperatura constante** no es satisfactoria. Es más acertado llamarlo **período de velocidad de secado constante** ya que se cumple para cualquier material.

1.5 Generalidades del proceso de secado solar natural

Durante el proceso los materiales se exponen directamente a la radiación solar colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos (Figura 1. 2), es uno de los usos más antiguos de la energía solar (Montero, 2005), siendo aún el proceso más utilizado en países en vías de desarrollo para el secado de productos agrícolas (Saravia et al., 1990; Corvalan et al., 1995; Anwar y Tiwari, 2001; Berruta, 2004; Tiwari et al., 2004).

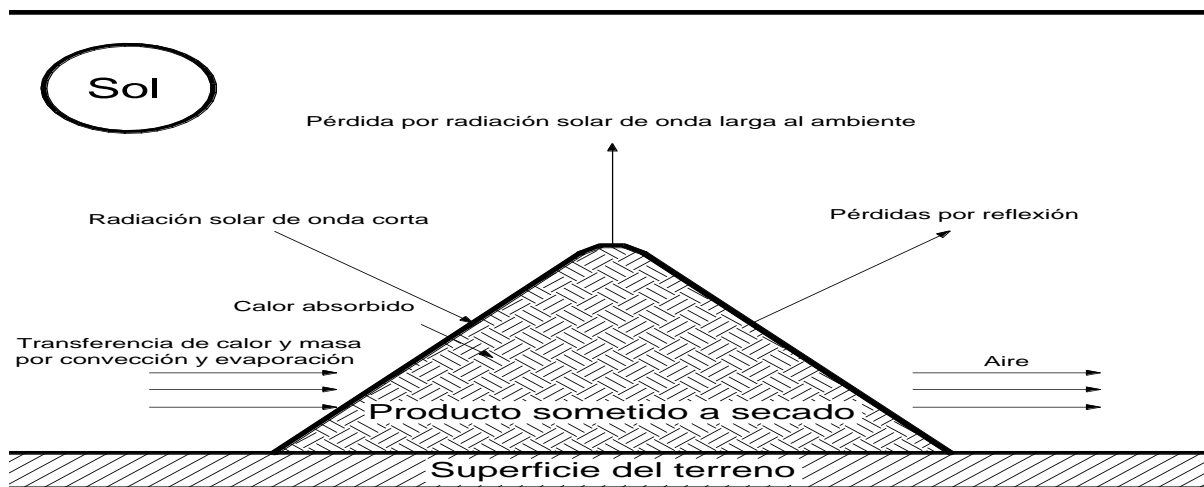


Figura 1.2 Esquema estructural del secado solar natural de materiales.

Fuente: Retirado, 2010.

Es un procedimiento con muy bajo costo que por sus múltiples ventajas y perspectivas es ampliamente utilizado a nivel mundial (Karathanos y Belessiotis, 1997; Esper y Mühlbaue, 1998; Ekechukwu y Norton, 1999; Hollick, 1999; Tiwari, 2002; Tunde-Akitunde et al., 2005). En Cuba, su empleo se reduce a la industria de los alimentos, el café y la madera (Ferro et al., 1999, 2000; Fonseca et al., 2000, 2002, 2003; Griñán et al., 2003; Abdala et al., 2003; Bergues et al., 2006; Pacheco et al., 2006) y en menor medida en la industria del níquel (Estenoz, 2001; Estenoz y Pérez, 2001; Estenoz et al., 2006; Retirado, 2007).

En el secado solar natural, como se ha indicado, el producto está expuesto a la radiación solar, al viento y a otras condiciones ambientales, siendo los requerimientos energéticos de la operación suministrados por la energía solar, como fuente única de energía. Como se aprecia en la Figura 1.2 una fracción de la radiación de onda corta incidente del sol es absorbida por el producto y la otra parte es reflejada. Una fracción de la radiación absorbida y el aire caliente que circula sobre el producto provoca el calentamiento superficial del mismo, dando lugar a la propagación de calor al interior (consiguiéndose la variación de la energía interna y por consiguiente el

aumento de la temperatura del producto y la producción de vapor de agua) y a la evaporación de la humedad superficial, lográndose de esta forma la desecación del producto. Sin embargo, la otra fracción se pierde por la transmisión de la radiación de onda larga al ambiente y por la conducción a través de los elementos en contacto con el terreno.

En el presente trabajo se realiza un estudio teórico y experimental del secado solar natural de las menas lateríticas y aunque existen en la literatura diversos trabajos sobre el secado solar de diferentes materiales (Tiris et al., 1995; Mahmutoglu et al., 1996; Türk, 2003; Gigler et al., 2004; Touré y Kibangu-Hkembo, 2004), solo se dispone de estudios aislados para el material analizado y ninguno de ellos está destinado al mineral laterítico de Pinares de Mayarí.

1.5.1 Clasificación de los sólidos húmedos objeto de secado

Según Lykov (1968) estos se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con sus propiedades físicas coloidales. Se distinguen así los **cuerpos coloidales**, los cuales al ser secados cambian apreciablemente sus dimensiones, aunque conservan sus propiedades elásticas. Es de este tipo de coloide la Gelatina.

Los **cuerpos capilaroporosos** se tornan frágiles, poco compresibles y pueden reducirse a polvo cuando son secados. Son materiales de este tipo el carbón vegetal y la arena de cuarzo.

Los **cuerpos coloidales capilaroporosos** tienen capilares y pueden absorber cualquier líquido que los moje, independientemente de su composición química. Pertenecen a esta categoría la mayoría de los materiales que se someten al secado: turba, aserrín, bagazo, cartón, cereales, café y otros.

En dependencia del tamaño de sus poros los materiales del segundo y tercer grupo pueden clasificarse en subgrupos: macrocapilaroporosos (no tienen microporos, ni poros de tamaño intermedio, su radio es mayor que 10^{-7} m) y microcapilaroporosos (no tienen macroporos, su radio es menor que 10^{-7} m).

Aunque los materiales reales tienen frecuentemente una estructura combinada, **el mineral laterítico objeto de secado se clasifica como un material macrocapilaroporoso.**

1.5.2 Formas de enlace de la humedad con el material

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el proceso el enlace de la humedad con el material se altera.

La clasificación más completa de las diferentes formas de ligarse la humedad con el material es la ofrecida por Kasatkin (1987) la misma está basada en los estudios de la intensidad de la energía de enlace desarrollados por Rebinder (1979). De acuerdo con ésta, existen tres tipos de humedad: de enlace químico, físico-químico y físico-mecánico. A este trabajo ofrece particular interés el último tipo de enlace.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. La misma no puede ser eliminada del material por secado con regímenes de temperatura inferior a los 120°C.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y micro capilares (capilares con el radio medio mayor y menor de 10^{-7} m respectivamente). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como por la adsorción de la misma en el sólido. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado térmico, sino también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en poliméricos. Fundamentalmente la humedad contenida en los sólidos no es de carácter físico-químico, y por eso su extracción durante el proceso de secado exige un consumo de energía igual al calor de evaporación.

Con el secado solar del mineral se reduce sólo la humedad enlazada con el material de forma físico-mecánica. Esto se debe a que en el proceso no se puede eliminar completamente esta humedad en el material debido a que se trabaja con un rango de temperatura bajo que oscila entre 12 y 36 °C aproximadamente.

1.5.3 Movimiento de la humedad dentro del mineral laterítico

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber una migración de la humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. En el mineral laterítico este desplazamiento se denomina movimiento capilar, que es cuando la humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial.

Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se desarrolla el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado. Los regímenes de temperatura satisfactorios para eliminar los diferentes tipos de

humedades pueden ser determinados mediante el análisis térmico diferencial del material.

1.5.4 Mecanismos de secado. Transferencia de calor y masa

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa. Para esto es necesario conocer los elementos más importantes de la transferencia de calor y masa que funcionan en el secado por contacto directo.

Según Madariaga (1995), el intercambio de calor y masa depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a las externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y masa de la capa límite del gas y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido, sino de las condiciones del gas y estará controlado por la transferencia de calor y masa entre el medio ambiente y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del sol, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del ambiente, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Treybal, 1985; Perry, 1985; Menon et al., 1992).

En el secado por convección el sólido húmedo se pone en contacto con un gas caliente y el líquido de su superficie se vaporiza y difunde en el gas. En este caso el agente de secado cumple dos funciones: suministrar calor al

material húmedo y transporta al vapor de agua desprendido (Kern, 1969; Isachenko et al., 1979; Boizán, 1991).

En el secado por conducción el producto a secar se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes mediante ondas electromagnéticas (Perry, 1979; Incropera et al., 2003).

1.5.5 Factores que intervienen en el proceso de secado solar

Existen varios factores que tienen una marcada incidencia en el proceso de secado de materiales directos al sol como, la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, velocidad del viento, radiación solar, precipitaciones, ect.

Temperatura del aire

La temperatura desempeña un papel importante en el proceso de secado, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.

Humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura (Perry, 1984) Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa. Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tienen la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación, mientras menor sea la humedad relativa mayor es la posibilidad de reducir la humedad del material.

Velocidad del aire

La velocidad del aire tiene como función principal, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando la evaporación y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material. La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuando menor sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de la humedad. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite y el aire. Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación disminuye y el tiempo de secado aumenta. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación de aire fuerte y regular.

1.6 Aspectos fundamentales sobre el secado solar natural

Se conoce de prácticas internacionales que el manejo reiterado de las menas lateríticas en los depósitos de secado solar influye positivamente en la reducción de la humedad, el desmenuzamiento y la homogeneización del material (Estenoz et al., 2005). En Cuba el referido proceso se desarrolla en las empresas Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour, pero durante la implementación del mismo existen dificultades que limitan la obtención de eficiencias racionales en el mismo. En general se someten las menas lateríticas al secado a la intemperie (Figura 1.3) y no se conoce el potencial de secado de las regiones en el momento de la exposición del material y por tanto no se tiene la certeza de la variación de humedad que puede experimentar el producto y del tiempo que se requiere para reducir su contenido de humedad desde un valor inicial a otro final.



Figura 1.3 Implementación del secado solar natural del mineral laterítico.

Fuente: Retirado, 2010.

En ambas entidades productivas el secado solar natural se implementa de forma completamente empírica sin simulaciones matemáticas previas que permitan inferir la factibilidad técnica y económica de su implementación. Lo anterior es consecuencia, entre otros factores, de la ausencia de los modelos matemáticos apropiados para el cálculo de los parámetros fundamentales del proceso.

El secado solar natural de las menas lateríticas tiene como ventajas que es económico debido a que reduce los consumos energéticos durante el secado térmico, permite la reducción del tiempo de retención en los secaderos, lo que genera un aumento en la productividad de estos equipos. No requiere de fuentes de energía convencionales. Mitiga la contaminación del medio ambiente por emanaciones de gases producto de la combustión del petróleo en los secaderos; y entre las desventajas se pueden destacar que es lento y poco controlable por cuanto depende de las condiciones climatológicas, requiere de grandes superficies disponibles y genera la retención de minerales en los patios de secado.

1.6.1 Características que debe cumplir el patio para el secado solar

Piso nivelado: permite el secado uniforme del mineral y evita la formación de concentraciones de agua dentro del patio durante el drenaje y escurrimiento de lluvias.

Drenaje: debe ser eficiente, capaz de evacuar el agua en caso de lluvias, de lo contrario el secado será no uniforme y el mineral entrará con un elevado contenido de humedad al horno.

Lejanía del agua y de los árboles: el agua cerca aumenta la humedad relativa del entorno e influye en la humedad del material, los árboles contribuyen a la conservación de la humedad del entorno y refrescan la masa de aire caliente que circula en el patio.

Elevación: evita las inundaciones en caso de lluvia e impide el bloqueo del viento.

1.7 Características climatológicas del Yacimiento

Posee un clima tropical con una distribución estacional de las precipitaciones irregulares determinada por una significativa disminución de las mismas dentro del período lluvioso y una tendencia general a la ocurrencia de láminas máximas al final del mismo. Presenta dos máximos uno principal en octubre-noviembre y otro secundario en mayo-junio, de igual manera, presenta dos mínimos, el principal en febrero-marzo y el secundario en julio- agosto. El promedio anual de precipitaciones alcanza los 2000 mm, la evaporación es cercana a los 1600 mm. La combinación de la máxima evaporación con el mínimo de precipitaciones en el verano y el mínimo de evaporación con el máximo de precipitaciones en el invierno producen un resecamiento intenso en el verano y un exceso de humedad en el invierno. La temperatura media anual es de 27 °C; en verano fluctúa entre 30 y 32 °C, con máximas entre 34 y 36 °C y en invierno entre 14 y 26 °C con mínimas alrededor de los 12 °C mientras que la insolación es prácticamente constante todo el año. La media anual de la humedad relativa para las 7:30 horas es de 85-90 % y para las 13:00 horas está entre 70 - 75 %. Mientras que el régimen eólico refleja la ocurrencia mayoritaria de los vientos Alisios reforzados por las brisas marinas y contrarrestadas por el terral. La velocidad promedio de la brisa es en general de 5-15 km/h y mantiene una frecuencia de 180 días al año.

El viento reinante en la zona es la combinación Alisios-brisa marina con una frecuencia mayor que el 64 %. Generalmente el viento reinante es el de mayor velocidad promedio anual, que en la zona es de 3,9-4,4 m/s. El total de días con calmas presenta un promedio anual de 41 días. Las características ante expuestas indican que existen 8 meses del año donde las precipitaciones son moderadas. En este período se destacan los meses de verano donde existe una marcada disminución de las mismas, lo que conjugado con los regímenes de temperatura e insolación provoca la máxima evaporación de la humedad contenida en el aire y favorece la transferencia de calor entre el mineral y el Sol.

También el proceso de intercambio de calor y masa en el secado solar se intensifica debido a la velocidad del viento que genera la transferencia de calor y masa por convección forzada entre el mineral y el aire circundante.

1.8 Conclusiones del Capítulo

- El desarrollo del marco teórico de la investigación, permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el estudio experimental del proceso, a partir de la clasificación del sólido objeto de estudio que permite predecir el comportamiento del mecanismo de secado en correspondencia con sus propiedades físicas, la características climatológicas de la región y el tipo de humedad contenida.
- No se reportan investigaciones encaminadas al estudio experimental del secado solar del mineral laterítico en la región de Pinares de Mayarí, sin embargo los resultados favorables alcanzados en la empresa Ernesto Che Guevara de Moa permiten concluir que es posible la generalización del proceso.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El conocimiento del proceso, el desarrollo de expresiones que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial. Los secaderos constituyen uno de los equipos más consumidores de portadores energéticos en la planta de preparación de mineral, donde se seca todo el mineral extraído de la mina para reducirle el contenido de humedad con que llega.

En este capítulo se plantea como **objetivo**:

El estudio experimental del secado solar natural del mineral laterítico a escala piloto.

2.2 Materiales empleados en la experimentación

Los experimentos se realizaron en la Unidad Básica CEDINIQ de la Empresa Rene Ramos Latour utilizando el material transportado desde el frente de trabajo para el proceso tecnológico y el equipamiento industrial de carga, transporte y dosificación.

Para lograr representatividad se escogieron muestras de distintos frentes de explotación. En el desarrollo del trabajo se utilizaron varios instrumentos (Estufa, Desecadora, Balanza digital, Cronómetro, Tamices de 75, 50 y 25 mm) que permitieron la ejecución de los experimentos (figura 2.1). Todos formaron parte de las pruebas de humedad, y granulometría.



Figura 2.1 Estufa de secado.

Las mediciones de los parámetros climatológicos se realizaron en la estación meteorológica de Pinares de Mayarí, se empleó el equipo Davis EZ-Mount Groweather. El mismo presenta un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación virtual, utilizando un conjunto básico de sensores meteorológicos, el cual incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de datos en PC para las variables climatológicas de interés para la presente investigación.

En el trabajo se crea una base de datos del periodo analizado, determinando el comportamiento de la humedad de entrada y el consumo de combustible tomando como referencia los meses antes, durante y después de implantado el secado solar, para lograr una humedad final con las características deseadas. La situación en el periodo analizado del proceso de secado, se caracteriza por las deficiencias mecánicas y tecnológicas siguientes:

- Los sobreconsumos de petróleos son muy superiores a los planificados.
- No se puede hacer una alimentación homogénea porque no existe la posibilidad real de alimentación por la alta humedad del mineral laterítico de Pinares.
- Alta adherencia a las paredes de los embudos de los alimentadores por el mineral mojado provocando un incremento en el consumo de petróleo en cámara y disminución de la productividad de los secaderos por tupiciones.
- Poco drenaje en el Yacimiento de Pinares de Mayarí para evacuar el agua del terreno y facilitar su secado al sol y el remonte para facilitar su transportación y ubicación en el depósito de mineral.

2.3 Proceso de transporte del material a la industria

La Unidad Básica (UB) de Minas, que radica en la meseta Pinares de Mayarí, tiene como misión la explotación de menas lateríticas de níquel y cobalto, en la concesión minera Pinares Este; con el objetivo de suministrar a la planta Comandante René Ramos Latour 1 500 000 t al año, de materia prima mineral, con 1,07 % de Ni, 42 % de Fe y 0,106 % de Co, utilizando el sistema de explotación a cielo abierto con retroexcavadora. El sistema de transporte de la materia prima mineral hasta la industria se realiza utilizando tres medios fundamentales:

- 5 camiones rígidos de 50 t y 3 camiones articulados de 40 t, desde el frente de extracción hasta el punto de carga del transportador (conocido como P0).
- Transportador de banda (de 11 km) hasta el punto de carga de los vagones (P4).
- Ferrocarril, desde el punto P4 hasta el depósito de la planta (recorrido de 30 km).

Por su complejidad técnica, esta última etapa de la transportación constituye una dirección independiente dentro de la estructura organizativa de la empresa.

La Unidad Empresarial de Base Ferrocarril (UEBF) constituye uno de los eslabones fundamentales del proceso tecnológico de la empresa. Esta unidad es la encargada del traslado del mineral laterítico extraído en la mina Pinares de Mayarí y acarreado por un sistema de transportadores de 11 km hasta el punto de carga de los vagones (P4). Los vagones son traccionados por locomotoras hasta su descarga en el depósito de homogenización en la empresa. La velocidad promedio es baja (de 15 a 25 km/h) durante una trayectoria de 30 km.

El mineral recibido desde la mina posee diferentes características físicas y químicas, granulometría, humedad y composición. Por este motivo el mineral

tiene que ser previamente caracterizado e identificado y seleccionada la zona del viradero donde es mas conveniente su descarga.

El mineral debe ser homogeneizado con la formación de pilas mediante el remonte. Con esta operación se garantizan que se alcancen características similares para grandes volúmenes de mineral. Así se suministrará a la planta un material similar durante largo periodo de tiempo, además de propiciar un tiempo de reposo al mineral de varios días durante el cual pierde parte de su humedad inicial por la acción del aire y los rayos solares. Con esto se logra una mayor estabilidad en el proceso de secado en los secaderos rotatorio, haciéndolo mas eficientes.

La operación de remonte se efectúa con una grúa o dos en caso necesario. Tomando en cuenta la productividad por grúa y la capacidad de carga de cada vagón de mineral, una grúa puede remontar 50 vagones en un turno de trabajo de 8 horas. La profundidad en el viradero será para dar capacidad aproximada para 2 vagones uno sobre otro. Durante el remonte el operador debe abrir la jaiba al comienzo de la pila durante el movimiento del carro de una ladera a otra de ella, alternando la operación en un sentido y otro para que el mineral se distribuya lo más uniforme posible. La altura de la pila no debe ser mayor que el nivel inferior del carro de la grúa.

El remonte debe ser planificado según el tipo de mineral y la zona del mismo debe ser marcada. Se efectuara a lo largo de 6 vagones de ferrocarril, aproximadamente (60 m).

Para el éxito del remonte debe existir una coordinación correcta con ferrocarril y este estará en función del itinerario de trenes a virar. Ferrocarril debe situar los vagones señalados según el tiempo planificado. La planta debe tener definida de antemano el área de virado de los mismos y capacidad en viradero para recibirlos.

Cuando el depósito se encuentra a máxima capacidad se efectuara la operación de alimentación y remonte combinada. Una grúa irá remontando directamente sobre la zona que se va abriendo durante la alimentación de

pila de dos grúas cercanas y en un mismo sentido. Logrando esta armonía se gana en espacio y organización.

Las velocidades de la alimentación y el remonte son diferentes. Dependen del tipo de mineral, la habilidad del grueso, el volumen de mineral que procesa la planta, la altura de la pila, la capacidad del alimentador móvil y de otras. Se tiene que trabajar siempre en base a adelantar en el remonte y mantener una alimentación segura y estable. La alimentación debe efectuarse en cortes transversales y parejos en la pila desde arriba hasta abajo y el remonte haciendo una pila de altura uniforme a todo lo largo del depósito.

La empresa a principio del 2012 y como alternativa para reducir el alto % de humedad de entrada en el proceso de preparación de mineral como uno de los principales factores que atenta a la ineficiencia de la planta así como al consumo de esta crea un deposito de mineral en el área donde anteriormente se encontraba el de carbón (figura 2.2), el área de descarga tiene capacidad para 100 vagones, con un largo de 200 m, es decir se depositan 5 vagones cada 10 m, uno sobre otro.

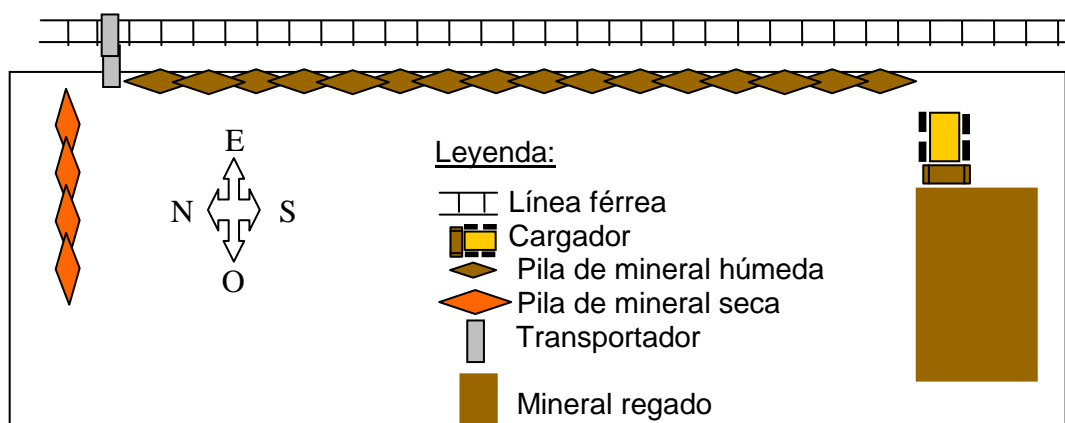


Figura 2.2 Depósito de hormigón.

2.4 Período de investigación y medidas tomadas para mejorar el comportamiento del proceso

Con el fin de eliminar algunos de los problemas provocados por la alta humedad del mineral, se realizó por el personal técnico de la empresa una

investigación para desarrollar un plan de mejoras en el secado del mineral y para ello se tomó la dedición de crear un deposito intermedio en la Mina Pinares y otro en el depósito de hormigón situado en un lateral del deposito de mineral húmedo para realizar pruebas de secado. La investigación comprendió el período 2011 y hasta junio del 2012, es decir antes y después del secado solar. Para lograr y llevar a cabo los cambios que influyen directamente en el proceso de secado, se trabajó en varios aspectos fundamentales.

Por las condiciones climatológicas desfavorables que existen en los depósitos P-O y P-1 de Pinares se realizan las pilas en formas de cordilleras y se realiza el secado por escurrimiento de forma que con esto existan inventarios de mineral escurriéndose el mayor tiempo posible antes de alimentarlo al transportador. En el punto de carga al lado del transportador P-4 se realizó un depósito almacenando el mineral en forma de pila y como las condiciones ambientales son mas favorables se transporta el mineral mas seco en los vagones.

De igual forma en el depósito de hormigón se tomaron varias medidas para garantizar que el mineral llegue con las características ideales en % de humedad a los secaderos rotatorios.

1. Se garantizó que el área donde se van a descargar los vagones esté limpia para evitar la contaminación del mineral.
2. Los vagones deben descargarse uno a continuación de otro, a todo lo largo del depósito.
3. Observar las condiciones ambientales existentes:
 - De existir condiciones climáticas favorables (sin lluvia), se procederá a regar el mineral sobre el depósito de hormigón, con una altura máxima de 0,1m (10cm), orientadas hacia el oeste, lo que facilitará dejar espacio para los vagones que se van a descargar posteriormente.
 - De existir condiciones climáticas desfavorables (en este caso lloviendo): separar con el cargador el mineral de la pared de

descarga, para permitir la continuidad de la operación y hacer las pilas lo más grande posible, para que se escurra el mineral y haya la menor superficie posible en contacto directo con las lluvias.

4. Se toman muestras de mineral para conocer la humedad de entrada al depósito.
5. Se esparcen los vagones de mineral a todo lo ancho del depósito, en horario nocturno, de forma tal que al salir el sol el mismo esté expandido totalmente.
6. En el proceso de esparcimiento del mineral, el cargador extraerá todo el que esté pegado al muro alejándolo como mínimo 5 m del mismo, y conjuntamente con una motoniveladora o buldózer se procede al esparcimiento, pasando intencionalmente tantas veces como sea posible sobre el mineral, para compactarlo y que la humedad salga con mayor facilidad, también se puede pasar una compactadora durante el día.
7. Se pasa un rastrillo de 0.1 m de altura en dirección de este a oeste y oeste a este, cada 2 horas, con lo que se logra acelerar el secado.
8. A partir de las 4:00 pm este mineral se recoge y se acomoda en forma de cordilleras con una altura superior a los 2,8 m de este a oeste, al norte del transportador que:
 - esta listo para alimentar a los secaderos.
 - se cubre con una lona para protegerlo de las lluvias.
 - se alimenta para almacenarlo en el depósito interior.
9. La recogida se realiza de sur a norte, dejando la superficie del hormigón bien limpia, depositándolo próximo al área de alimentación.
10. A estas pilas se le toman muestras para saber la humedad final, que en condiciones normales debe oscilar de 25 % a 30 %, además de tomar muestras para composición química.
11. El mineral se esparce solamente en la mitad de la superficie disponible del depósito y se compacta.

12. A partir de la 1:00 pm, se pasará la mayor parte del mineral para la otra mitad del depósito, (dejando una capa muy fina), de esta forma en la nueva área se aprovecha la energía calórica almacenada en el hormigón, para el secado de la parte inferior de la masa de mineral y la energía solar para la parte superior de la masa de mineral.

Todas estas medidas en los depósitos creados traerían una reducción considerable del consumo de combustible en el proceso de secado y mejoraría la eficiencia metalúrgica de planta de secaderos y la industria en general.

2.5 Método para el cálculo del área de transferencia de calor y masa de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural

Para obtener el área de transferencia de calor y masa de una pila de menas lateríticas expuesta a secado solar natural formada simétricamente, se tienen en cuenta las áreas laterales y frontales presentes en la misma, considerando que las primeras corresponden a superficies rectangulares y las segundas a superficies cónicas, como se muestra en la Figura 2.3

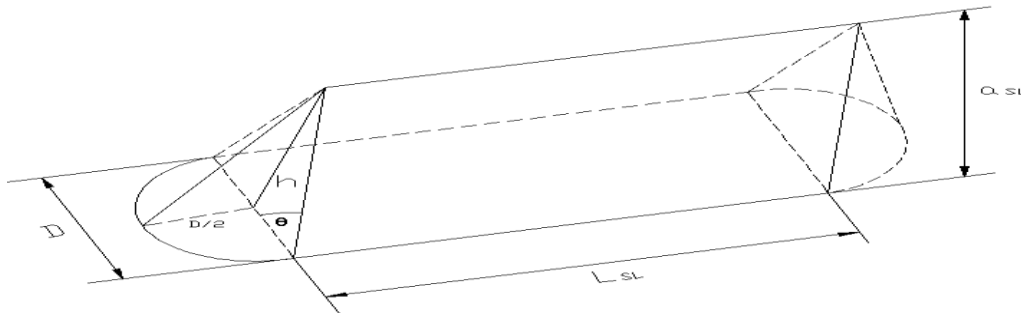


Figura 2.3 Esquema estructural útil para el cálculo del área de transferencia de calor y masa de una pila de menas lateríticas de configuración mixta.

Luego de los análisis correspondientes, la expresión de cálculo resultante es:

$$A = 2 \cdot A_{SL} + A_C \quad (2.1)$$

Donde:

A: área total de transferencia de calor y masa de la pila de menas lateríticas; m^2 .

A_{SL} : área de la superficie lateral de la pila; m^2 .

A_C : área lateral del cono formado entre los dos extremos de la pila; m^2 .

Teniendo en cuenta que las superficies laterales son rectangulares, las áreas pueden ser calculadas por la expresión 2.2.

$$A_{SL} = a_{SL} \cdot L_{SL} \quad (2.2)$$

Donde:

a_{SL} : ancho de la superficie lateral de la pila; m.

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

Aplicando trigonometría se obtiene que:

$$\cos \theta = \frac{D}{2 \cdot a_{SL}} \quad (2.3)$$

Despejando a_{SL} resulta:

$$a_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \quad (2.4)$$

Donde:

D: ancho de la base de la pila de menas lateríticas; m.

θ : ángulo de talud natural de las menas lateríticas; grados.

Sustituyendo la ecuación 2.4 en la 2.2 se obtiene:

$$A_{SL} = \frac{D}{2 \cdot \cos \theta} \cdot L_{SL} \quad (2.5)$$

Luego el área lateral del cono formado por los extremos de la pila de menas lateríticas puede ser calculada por la ecuación 2.6 reportada por Stewart (2009).

$$A_C = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \quad (2.6)$$

Donde:

h: altura de la pila de menas lateríticas; m.

Sustituyendo las expresiones 2.5 y 2.6 en la ecuación 2.2 se obtiene:

$$A = \frac{D}{\cos \theta} \cdot L_{SL} + \left(\pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \right) \quad (2.7)$$

El parámetro D puede ser calculado en función del ángulo de talud natural de las menas lateríticas (θ) y la altura de la pila (h), luego:

$$\tan \theta = \frac{h}{D/2} = \frac{2 \cdot h}{D} \quad (2.8)$$

Despejando se obtiene:

$$D = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.9 en la 2.7 resulta:

$$A = \frac{2 \cdot h}{\tan \theta} \cdot \frac{L_{SL}}{\cos \theta} + \left(\frac{\pi \cdot h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \right) = \frac{2 \cdot h \cdot L_{SL}}{\sen \theta} + \left(\frac{\pi \cdot h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \right) \quad (2.10)$$

También en ocasiones el secado solar natural de las menas se desarrolla usando pilas cónicas, en ese caso se sustituye la expresión 2.9 en la 2.6 y el área de transferencia de calor y masa donde se lleva a cabo la evaporación se determina por la ecuación 2.11.

$$A = \frac{\pi \cdot h}{\tan \theta} \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \theta} + h^2} \quad (2.11)$$

Las ecuaciones 2.10 y 2.11, establecidas para el proceso analizado, constituyen los modelos matemáticos que permiten calcular el área de transferencia de calor y masa de pilas de menas lateríticas de configuraciones mixtas y cónicas respectivamente, conociendo dos parámetros geométricos de la misma (altura y longitud de la superficie lateral) y una propiedad del material (ángulo de talud natural).

2.6 Diseño de experimentos

2.6.1 Instalación experimental para el estudio de la humedad

Los experimentos se realizaron en el patio de secado solar de la empresa René Ramos Latour que se encuentra situado al lado del depósito exterior de la planta de preparación de mineral, se escogió este lugar para garantizar la representatividad de las condiciones normales de explotación. El patio antes mencionado cumple con las características descritas en el epígrafe 1.6 del capítulo precedente.

2.6.2 Selección de las variables

Las variables medidas de forma directa en las pilas de mineral depositado son: masa de mineral a secar, humedad inicial del mineral, granulometría, adherencia y

humedad final del mineral. Las restantes se obtuvieron de acuerdo con la estación meteorológica de Pinares de Mayarí.

2.6.3 Masa de mineral a secar

Para el estudio se utilizaron cuatro pilas (1, 3, 6 y 48 t) del mineral de la mina de Pinares de Mayarí. Se experimentaron con estas masas para determinar la influencia que tiene en el comportamiento de la humedad durante el proceso. Estos valores son representativos del proceso a escala piloto y se seleccionan de acuerdo con las normas establecidas para estos tipos de yacimientos (Mitrofánov et al., 1982).

2.6.4 Humedad inicial del mineral

Aunque varía aleatoriamente para el mineral laterítico, la misma influye considerablemente en el tiempo de secado durante el proceso. Se empleó el método de obtención de muestras puntiformes con red rómbica, recomendado por Mitrofánov et al. (1982).

2.6.5 Granulometría

Constituye un importante factor que permite caracterizar al mineral laterítico como ya lo han definido Quintana (1985) y Almaguer et al. (1993), aspecto que incide tanto en el comportamiento del mineral durante determinados procesos, como la sedimentación de la pulpa limonítica (Falcón, 1987; Garcell, 1991), o en la concentración de determinados elementos (Rodríguez, 1990), lo que puede definir una vía para establecer las fases minerales portadoras del níquel y cobalto, entre otros metales de interés en los horizontes lateríticos (Rojas, 2001).

La granulometría se midió mediante el método de tamizado, el cual consiste en cernir la muestra a través de un juego de tamices y determinar el porcentaje de residuo en cada tamiz respecto a la masa de la muestra inicial. Las muestras tomadas fueron de 105 kg promedio. Los agujeros de los tamices son de 78, 75, 50. 25 y 5 mm y se cernieron durante 180 s.



Figura 2.4 Juego de tamices.

La granulometría y la humedad están íntimamente relacionados, la alimentación de mineral muy fino, dificulta el proceso de secado debido a que se elimina solo el agua superficial, quedándose el agua reticular o interna, que ayuda a la aglomeración del mineral, provocando humedad en el producto secado (formación de pellets que además entorpecen la molienda). De aquí se desprende que es necesaria la homogenización del mineral antes de alimentarlo a secaderos según esta establecido debido a que las partículas de mayor tamaño ayudan a romper “pelets” y por ende se reduce el contenido de humedad en el producto final, es decir, reduce el consumo de petróleo y mejora la eficiencia de los tambores secadores.

2.6.6 Humedad final del mineral

Para analizar el comportamiento de esta variable en los días de experimentación se hicieron mediciones de humedad por cada pila de mineral depositado. En ambos casos (humedad inicial y final) se determinaron por el método de diferencia de pesadas. La técnica de muestreo fue la misma empleada para la humedad inicial.

Las variables climatológicas (temperatura del medio ambiente; T_{ma} , radiación solar; R_s , velocidad del viento; V_v y dirección predominante, precipitaciones; P , humedad relativa; H_r y temperatura del punto de rocío; T_{pr}) tienen un comportamiento aleatorio por tanto no pueden ser prefijadas para la experimentación.

2.6.7 Secado solar en el depósito de hormigón cerca de la Industria

Para el secado solar del mineral se depositan los vagones de mineral húmedo en el depósito de hormigón, el que se encuentra ubicado al oeste del depósito exterior de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”.

El mineral es regado con un cargador frontal o un buldózer sobre toda la superficie del hormigón a una altura de 0.1 m (10 cm), tomando una muestra al regarlo, a la 1:00 pm y otra al recogerlo o a las 4:00 pm. De esta forma podemos ver la reducción de la humedad en el día, además por donde pasan las ruedas del equipo que riega, se toman muestras de ese mineral compactado para ver el efecto de este proceso.

Las muestra tomadas para realizar la humedad del mineral fue de 10 kg aproximadamente, de un área de 0.3 m por 0.3 m hasta dejar limpio el hormigón, la cual se homogenizó y se colocó en una estufa 3.0 kg hasta que el peso de la muestra se mantiene constante, indicando que su humedad es cero y de esta forma determinamos la humedad en base húmeda.

2.7 Número de corridas experimentales

Se realizaron 12 mediciones de la humedad para cada una de las 4 pruebas de secado, lo que concluye con un total de 48 mediciones experimentales. Se procedió según el diseño factorial completamente aleatorio o al azar, se escogió éste tipo de diseño porque es el recomendado cuando interesa saber el efecto de la combinación de los diferentes niveles de los factores, al variar aleatoriamente en muestras homogéneas (Guzmán, 1986; Guerra et al., 2003).

2.7.1 Técnica experimental para la prueba de humedad

El proceso de medición de la humedad del mineral laterítico se realizó por el método tradicional de diferencias de pesadas. Se escogió éste por la confiabilidad que brinda en los resultados, su sencillez y fácil aplicación (Miranda, 1996).

Para determinar el contenido de humedad se toman muestras de las capas superficiales de las pilas seis veces al día (8:00 AM; 10:00 AM; 12:00 M; 2:00 PM 4:00 PM y 6:00 PM). Las muestras de alrededor de 1000 g, pesadas en

una balanza digital en el momento de la toma. Posteriormente se someten al secado en una estufa alrededor de cinco horas a una temperatura de 105 °C, luego se enfriaron en una desecadora, se pesa la muestra seca y se determina el contenido de humedad por la expresión 2.12 reportada por Martínez-Pinillos (1997).

$$H = \frac{W_I - W_F}{W_I} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Donde:

H: contenido de humedad; % .

W_I : masa inicial de la muestra; g .

W_F : masa final de la muestra; g .

Prueba de adherencia

Para ello se realizó una prueba a escala de laboratorio, que permitió obtener el comportamiento de la adherencia a diferentes niveles de humedad. La misma consistió en dejar caer una masa de mineral de una determinada altura (0,5 m) sobre una placa de metal con cierto ángulo de inclinación. Los ángulos escogidos fueron de 20 y 25° respectivamente, se tomaron estos ángulos porque son los que se corresponden con la inclinación de las paredes de las tolvas donde descargan los transportadores de banda de la planta, también se adhiere el mineral a la cama de los camiones VOLVO utilizados en el transporte del material en la mina y en los vagones del ferrocarril. Por cada ángulo se realizaron dos mediciones a un mismo contenido de humedad, con una masa de 300 g aproximadamente en cada medición, se recogían por separado la parte de la muestra que se adhería y la que no lo hacía, luego se pesaban cada una para determinar el por ciento que se adhería por cada muestra.

Por adherencia se entiende la capacidad que tiene el mineral de adherirse a las superficies de los cuerpos en que son trasladados. Es un comportamiento indeseable en el transporte del mineral laterítico, que afecta la productividad del proceso. El mismo se presenta cuando las fuerzas de cohesión entre las

partículas de la capa superficial del mineral y la superficie del medio de transporte o almacenamiento son superiores a las fuerzas de cohesión entre las partículas. Fundamentalmente la adherencia depende de las características del mineral (si es más o menos arcilloso) y de su contenido de humedad (Oriol et al., 1988).

2.8 Estado actual de la adherencia del mineral en la empresa René Ramos Latour”

La adhesividad del mineral laterítico es un problema no resuelto en la referida empresa debido a que genera la recirculación del material en las bandas transportadoras con la consiguiente disminución de la productividad del sistema de transporte (Sierra, 2005). El mineral de pinares de Mayarí después de extraerse y alimentarse al transportador con una humedad que oscila entre 38% y 40% situación esta que dificulta las operaciones del mineral desde la alimentación en P-0(transportador), donde se tupe la tolva inicial y el rechazo sale con mineral de calidad, que se pierde, hasta la descarga de los vagones en el depósito exterior de la empresa donde se dificulta también porque al quedarse pegado el mineral a los vagones puede provocar que estos se caigan al depósito, al llegar a la planta se tupen los alimentadores y provoca la formación de túneles en los secaderos cilíndricos que elevan el consumo de combustible durante el secado (Torres, 1999). En el año 2003 se realizó una prueba de secado solar y el mineral al ser transportado se adhería a las paredes de las tolvas. Este fenómeno no se ha podido explicar hasta el momento aunque varios investigadores se han referido al respecto (Gutiérrez, 2003; Durán, 2006).

2.9 Comportamiento de la humedad del mineral a la entrada de la industria

En la figura 2.5 se puede ver el comportamiento de la humedad del mineral a la entrada de la planta de preparación de mineral de la ECRRL, a partir del año 2004 hasta junio del 2012 ya con el secado solar implementado.(Anexo 1)

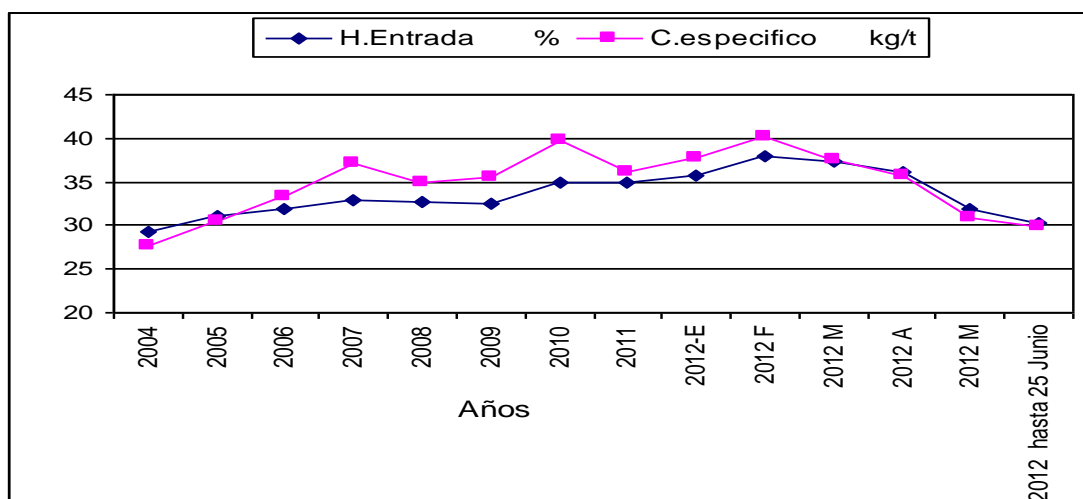


Figura 2.5 Comportamiento de la humedad y en consumo específico de combustible del año 2004 a junio del 2012.

Se observa que a partir del comienzo de la alimentación del mineral de Pinares solamente, motivado por la decisión del sierre de mina Martí por agotamiento minero, la humedad comienza a incrementarse de 31.98 % hasta 37.96 % en febrero del 2012. El consumo específico de combustible también se incrementa desde 33.26 kg/t hasta 40,19 kg/t para igual etapa. Ya con las operaciones del secado solar comienza a bajar nuevamente la humedad del mineral y con ello el alto consumo de combustible, demostrándose la incidencia significativa que tiene la humedad en el consumo de combustible de los secaderos térmicos.

2.10 Conclusiones del capítulo

- Se describe el proceso de transporte del material a la industria como objeto de estudio.
- Se toman diferentes medidas para la reducción de la humedad de entrada a la industria mediante la implementación del secado solar.
- El estudio realizado logro determinar que con la entrada en operación solamente de la Mina Pinares en el año 2006 hubo un incremento en la humedad del mineral con gran incidencia en el consumo de petróleo de la planta de preparación de mineral.

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1 Introducción

En la actualidad las investigaciones que se desarrollan en Cuba deben considerar tres aspectos esenciales, ellas deben ser técnicamente racionales, económicamente factibles y ambientalmente viables, es por ello que todos los trabajos investigativos ejecutados deben considerar el análisis de los resultados fundamentales basados en estos criterios, en tal sentido el objetivo del presente capítulo es: valorar los resultados obtenidos en la investigación considerando los criterios técnicos, económicos y ambientales más importantes asociados al secado solar del mineral laterítico.

3.2 Resultados experimentales

A continuación se exponen los resultados obtenidos en las pruebas para la humedad y granulometría para las diferentes condiciones de experimentación.

3.2.1 Humedad del mineral laterítico durante el secado solar

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de humedad superficial para ambas pilas en correspondencia con la variación de los parámetros climatológicos más influyentes en el proceso. Estos últimos fueron obtenidos en la estación meteorológica de Pinares de Mayarí.

Tabla 3.1 Mediciones de la humedad para las diferentes pilas en correspondencia con la variación de los parámetros climatológicos.

	Humedad de las Pilas (%)				Ta (°C)	Rs (W/m ²)	Vv (m/s)	P (mm)	Hr (%)	Pr (°C)
Med.	Prueba 1 1t	Prueba 2 3t	Prueba 3 6t	Prueba 4 48 t						
0	37,40	36,80	35,60	38,70	31,0	155	3,35	5	70	24,8
1	32,60	32,12	33,18	34,0	29,4	638	3,83	10	75	24,6
2	26,00	27,46	29,0	29,6	31,2	625	2,70	0	62	24,3
3	25,90	26,00	27,19	27,48	30,7	975	2,75	0	74	21,9
4	33,86	34,90	33,40	31,22	29,1	169	5,0	68	76	23,0
-	3,54	1,9	2,2	7,48	← Variación de la humedad (%)					

Ta: Temperatura ambiente

Rs: Radiación solar

Vv: Velocidad de los vientos

P: Precipitación

Hr: Humedad relativa

Pr: Punto de rocío

En los resultados mostrados en la Tabla 3.1 se observa, en general, un comportamiento aleatorio de la variación de humedad del mineral debido, entre otros factores, a las diferencias que existen entre las masas de las pilas y las humedades iniciales del material.

3.2.2 Granulometría

En el Anexo 2 se exponen los resultados de la granulometría en función de la humedad del mineral laterítico, se obtienen los valores para las humedades predominantes en los yacimientos lateríticos de la empresa René Ramos Latour.

Los resultados se procesan estadísticamente y se obtienen los valores promedios, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las distribuciones granulométricas para los diferentes niveles de humedad que se muestran en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Promedio, Desviación estándar y Coeficiente de Variación de las distribuciones granulométricas para diferentes grados de humedad.

Para 40 de Humedad			
Clases (mm)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de variación (%)
+75	8,49	0,79	9,27
-75 +50	8,37	1,00	11,90
-50 +25	12,22	0,22	1,77
-25 + 0	70,72	1,69	2,39
Para 38% de Humedad			
Clases (mm)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de variación (%)
+75	11,61	2,45	21,12
-75 +50	6,57	1,52	23,20
-50 +25	10,00	2,23	22,29
-25 + 0	72,10	3,43	4,76
Para 34% de Humedad			
Clases (mm)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de variación (%)
+75	15,35	2,71	17,65
-75 +50	5,32	1,39	26,09
-50 +25	10,76	0,75	7,00
-25 + 0	68,58	1,47	2,14
Para 30% de Humedad			
Clases (mm)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de variación (%)
+75	1,57	0,40	25,59
-75 +50	5,15	0,80	15,58
-50 +25	8,08	0,28	3,49
-25 + 0	85,34	1,18	1,39

Los resultados mostrados en la tabla 3.2, están representados en la Figura 3.1, los comportamientos de las distribuciones granulométricas indican un aumento del porcentaje de la clase granulométrica -25+0 mm en la medida en que el material se seca (menor % de humedad), lo que es indicativo del desmenuzamiento que sufre el mineral, lo cual es positivo para el proceso porque reduce la adherencia del mineral a los dispositivos (camas de carros,

bandas transportadoras y vagones) de los sistemas de transporte automotor y por bandas.

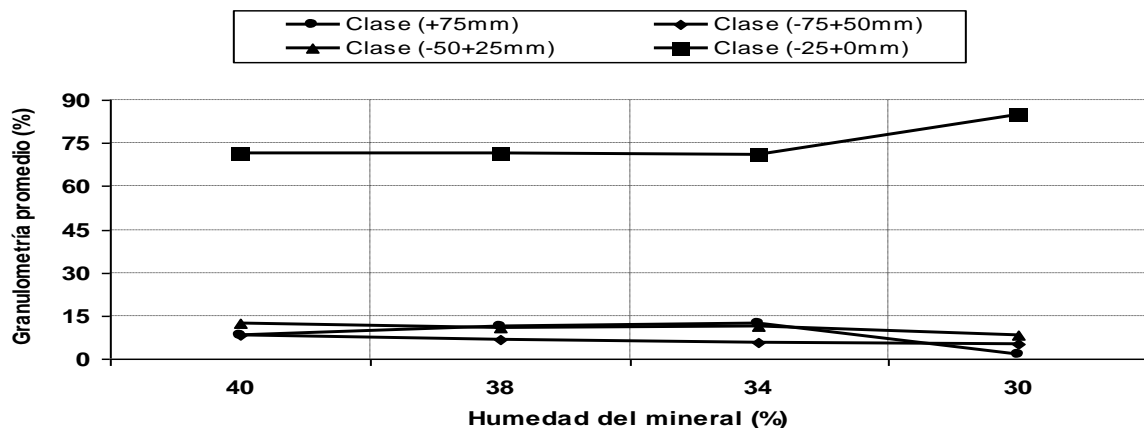


Figura 3.1 Comportamiento de la granulometría del mineral laterítico.

3.2.3 Densidad real y composición química del mineral

Para la identificación del mineral laterítico se tomaron cinco muestras. Después de terminada la prueba, estas muestras se analizaron químicamente, obteniéndose las composiciones químicas de Ni, Co, Fe, SiO₂ y MgO. Posteriormente se determinó la densidad real, cuyos valores se indican en la Tabla 3.3. Estas determinaciones se realizaron en el laboratorio analítico de la Unidad de Proyecto Nicaro del Centro de Investigaciones del Níquel.

Tabla 3.3 Densidad real y composición química del mineral laterítico

Muestras	Densidad real (kg/m ³)	Composición química (%)				
		Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO
1	3 670	1,12	0,135	47,3	4,65	1,71
2	3 770	1,12	0,135	47,4	4,80	1,79
3	3 760	1,13	0,135	47,5	4,62	1,79
4	3 750	1,11	0,134	47,2	4,65	1,59
5	3 680	1,11	0,133	47,3	4,45	1,59
Promedio	3 730	1,11	0,134	47,3	4,63	1,69

En general los valores de la densidad real obtenidos para las muestras investigadas reflejan una variación, que para los minerales, es poco significativa. Además se observan pequeñas variaciones en la composición

química de los elementos fundamentales, destacándose los elevados porcentajes de Hierro presente en las muestras, lo que es normal porque los minerales lateríticos que son esencialmente ferrosos por estar constituidos por Goethita.

3.2.4 Secado de mineral en el depósito de hormigón al oeste del depósito exterior

El mineral depositado por los vagones de ferrocarriles es regado a una altura de 10 cm por los cargadores frontales o buldózer de esteras.

Tabla 3.4 Variaciones de la humedad del material cuando se recoge a las 4:pm, se toma muestra a la 1: pm y cuando se compacta

	08:00 a.m.	4:00 pm			
			Tbh	Tamb	HR
Promedio	33,5	28,2	24,5	28,2	79,9
Máximo	46,0	41,0	27,3	31,1	88,6
Mínimo	20,0	16,0	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	5,50	5,60	1,50	1,40	4,10

	08:00 a.m	01:00 p.m.			
Promedio	34,3	32,3	24,1	27,9	79,4
Máximo	46,0	44,0	26,6	30,5	88,6
Mínimo	20,0	25,2	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	5,50	3,90	1,20	1,20	4,20

	08:00	Compactado			
Promedio	29,5	17,7	24,5	28,2	79,9
Máximo	39,0	26,3	27,3	31,1	88,6
Mínimo	24,0	12,9	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	3,60	3,80	1,50	1,40	4,10

Los resultados, anexo 3, reflejan que la humedad promedio del mineral a secar fue de 33,5 % oscilando de 46.0 % a 20.0 % y al cabo de ocho horas su humedad promedio era de 28.2 % moviéndose de 41.0 % a 16.0 % para una diferencia entre las humedades promedios de 5.4 %, con temperatura de bulbo húmedo promedio de 24.5 °C, la temperatura ambiente de 28.2 °C y humedad relativa promedio de 79.9 %.

Cuando se toman muestras a la 1:00 pm después de haberse regado a las 8:00 am como se muestra en el anexo 4 que la humedad del mineral promedio de alimentación es de 34.3 % y a la 1:00 pm es de 32.3 % el mineral en las primeras cinco horas logra reducir su humedad un 2.0 %, con una temperatura de bulbo húmedo promedio de 24.1 °C y temperatura ambiente de 27.9 °C para una humedad relativa de 79.9 %. Además se tomaron muestras por donde la rueda de los equipos compactaban el mineral dando valores más bajos de humedad (Anexo 5) promediando la humedad del mineral de alimentación de 29.5 % y el de recogida 17.7 % para reducir la humedad en un 11.9 %, con una temperatura de bulbo húmedo promedio de 24.5 °C y temperatura ambiente de 28.2 °C para una humedad relativa de 79.9 %.

3.2.5 Temperaturas a bulbo seco y húmedo

Las mediciones de temperatura se realizaron en la estación meteorológica de Pinares de Mayarí se registraron los valores cada 2 horas (de 8:00 AM a 6:00 PM) por cinco semanas que duró el experimento. En la investigación se consideraron los valores promedios por cada uno de los horarios considerados (Tabla 3.5).

Los resultados de la interpretación tabulada se observan en la figura 3.2. Los mayores valores de las temperaturas consideradas se obtienen en los horarios comprendidos entre las 10: 00 AM y las 4:00 PM, lo anterior indica que en estos horarios se intensifica la velocidad del proceso de secado. Además se observa una diferencia aproximadamente constante entre los valores de ambas temperaturas que representa la capacidad de absorción de humedad que tiene el aire, en sentido general existe un potencial de secado que puede ser aprovechado en la implementación del secado solar natural del material en cuestión.

Tabla 3.5 Comportamiento diario de las temperaturas ambiente y a bulbo húmedo

Semanas	Hora	Temperatura (°C)		Precipitaciones
		A bulbo seco	A bulbo húmedo	
Inicio 0	8:00 AM	28,8	26,2	5 mm
	10:00 AM	30,2	27,9	
	12:00 PM	30,2	27,5	
	2:00 PM	30,3	29,2	
	4:00 PM	29,2	26,8	
	6:00 PM	28,1	25,7	
1	8:00 AM	26,4	23,8	10 mm
	10:00 AM	30,9	26,5	
	12:00 PM	28,6	27,6	
	2:00 PM	31,0	28,4	
	4:00 PM	30,1	27,3	
	6:00 PM	27,4	27,0	
2	8:00 AM	28,3	23,0	nula
	10:00 AM	29,1	27,0	
	12:00 PM	32,3	31,0	
	2:00 PM	33,0	28,1	
	4:00 PM	32,5	28,6	
	6:00 PM	31,3	27,8	
3	8:00 AM	25,8	23,2	nula
	10:00 AM	29,8	27	
	12:00 PM	30,3	29,6	
	2:00 PM	28,2	27,3	
	4:00 PM	30,8	29,2	
	6:00 PM	26,7	25,2	
Final 4	8:00 AM	30,2	24,8	68 mm
	10:00 AM	31,3	29,6	
	12:00 PM	33,0	29,6	
	2:00 PM	31,0	29,2	
	4:00 PM	31,0	28,9	
	6:00 PM	28,7	25,8	

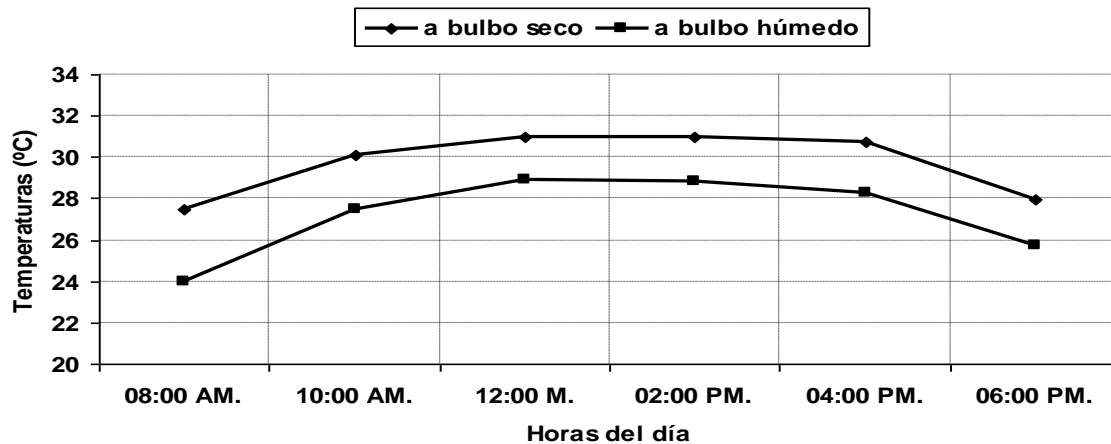


Figura 3.2 Comportamiento de las temperaturas a bulbo seco y húmedo del aire.

3.3 Análisis de los resultados obtenidos en la implementación del secado solar del mineral a escala piloto

3.3.1 Comportamiento de la humedad del mineral laterítico

Se experimentó con pilas de mineral laterítico de diferentes masas y dimensiones para comprobar en que medida varía la humedad del material y la velocidad de secado. Los comportamientos de la humedad para las pilas de minerales investigadas se ilustran en las Figuras 3.3 y 3.4. En ellas se exponen los resultados obtenidos en la planta piloto de Nicaro.

Los comportamientos mostrados en la tabla anterior (3.5) evidencian una tendencia similar que se manifiesta en las pendientes de las curvas características de cada una de las pilas consideradas. En general, se observan reducciones en el contenido de humedad en las tres primeras semanas, aunque en la semana inicial y la siguiente hubo ocurrencia de precipitaciones que oscilaron entre 5 y 10 mm.

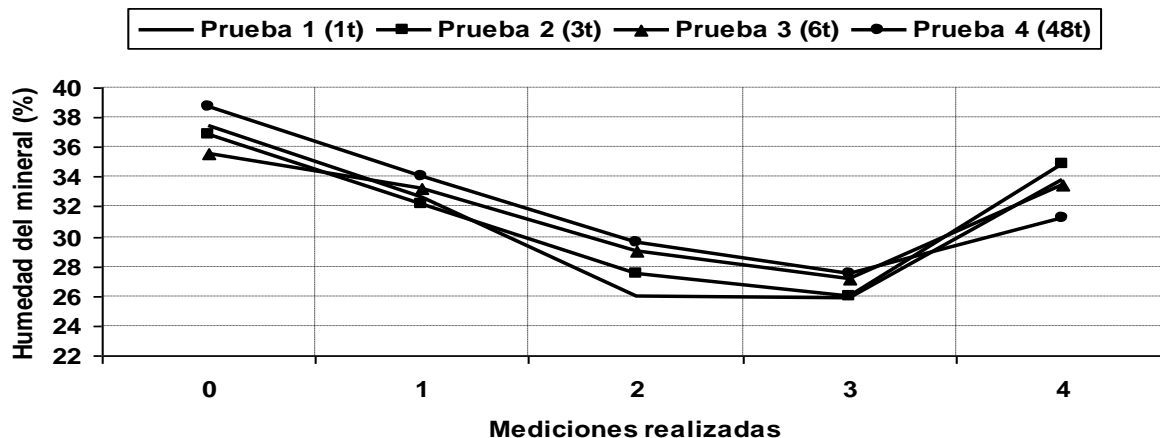


Figura 3.3 Comportamiento de la humedad del mineral laterítico secado al sol con ocurrencia de lluvias.

Las contracciones de la humedad para las tres primeras semanas de secado solar natural de las pilas de minerales fueron superiores al 8 % y en general oscilaron entre 8,41 y 11,5%. Sin embargo, cuando ocurrieron las fuertes lluvias (68 mm) la humedad, como es lógico, aumentó abruptamente, pero de cualquier forma los valores finales obtenidos fueron inferiores al valor inicial, al compararlos se aprecia una reducción superior al 1,5 % y una oscilación que estuvo entre 1,9 y 7,48 %. Los referidos comportamientos demuestran la incidencia negativa que ejercen las lluvias en el proceso de secado solar en condiciones naturales.

3.4 Otros ensayos de secado solar en pilas de diferentes masas y dimensiones

Como se aprecia, en la Figura 3.4, al ser depositadas el valor de la humedad inicial no depende directamente de la masa expuesta a secado, llegando a tener la pila de 1 t mayor contenido de humedad que las restantes, durante la primera semana cuando los parámetros climatológicos comienzan a ejercer su influencia las pilas de 1, 2 y 4 toneladas tienen un comportamiento similar y sus humedades se reducen entre 6,44 y 2,18 %. Sin embargo, los resultados asociados a las pilas de 8, 16 y 32 toneladas reflejan que la humedad prácticamente no experimentó cambios significativos respecto a los

valores iniciales, variando entre 1,54 y 1,15 % para iguales condiciones y tiempo de secado.

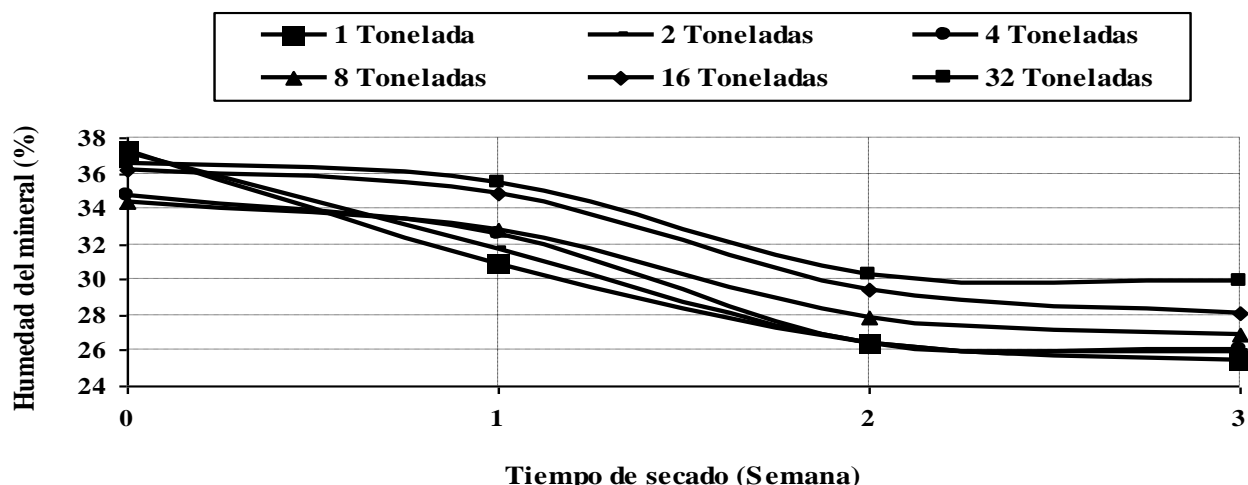


Figura 3.4 Comportamiento de la humedad del mineral laterítico secado al sol

Durante la segunda semana la velocidad de secado crece apreciablemente y se obtienen reducciones en el contenido de humedad entre 4,5 y 6,16 %. Sin embargo, en las pilas de 1, 2 y 4 toneladas la reducción promedio del contenido de humedad fue de 5,34 % mientras que para las pilas de 8, 16 y 32 toneladas fue de 5,24 %. Por su parte, durante la tercera semana las humedades de las diferentes pilas permanecen prácticamente constantes, la velocidad de secado fue muy baja y por tanto se obtienen pequeñas reducciones en el contenido de humedad para todas las pilas consideradas, las cuales oscilaron entre 0,28 y 1,3 %.

También se infiere que la pila de 1 t redujo su humedad en 11,87 % mientras que la pila de 32 t lo hizo en 6,64 % (1,78 veces menos) en 31 toneladas de diferencia entre ambas pilas, a pesar de que la pila de menor masa tenía una humedad inicial superior en 0,7 % al inicio del proceso. Los comportamientos anteriores demuestran la influencia que tiene la masa de material en la velocidad de secado, a este aspecto también se han referido otros investigadores (Condorí et al., 2001; Mwithiga y Olwal, 2005; Gógüs y Mascan, 2006). Los modelos estadísticos de la humedad respecto al tiempo de secado se exponen en el Anexo 6.

3.4.1 Determinación de la adherencia

A continuación se relacionan los diferentes valores de adherencia, para los ángulos de 20 y 25°, a distintos valores de humedad. La tabla 3.6 fue confeccionada con los experimentos realizados a dos de las pilas escogidas.

Tabla 3.6 Comportamiento de la adherencia respecto a la variación de la humedad (pila 1).

Humedad (%)	Angulo de 20°				Angulo de 25°			
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 1		Muestra 2	
	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA
39	91	149	114	157	84	189	83	166
38	88	190	94	211	87	206	79	221
37	96	194	93	173	84	201	93	200
36	82	185	91	211	93	180	83	197
35	69	217	59	241	78	219	66	251
34	96	163	73	157	58	177	100	153
32	77	194	84	101	34	157	31	163
29	87	111	124	67	42	144	96	166
28	79	97	85	194	26	146	25	120
26	55	115	75	126	35	175	44	194

Donde: MA; mineral adherido y MNA; mineral no adherido.

Para obtener el comportamiento de la adherencia para cada valor de humedad se hizo necesario determinar el promedio de mineral que se adhería por ángulo en cada valor de humedad. Para ello se sumaron todos los valores de MA correspondientes a un mismo valor de humedad y un mismo ángulo y se dividió por la suma (MA+MNA) correspondientes a el mismo valor de humedad e inclinación.

Tabla 3.7 Cantidad de material que se adhiere para 20 y 25° de inclinación (pila 1).

Humedad	%	39	38	37	36	35	34	32	29	28	26
Mineral que se adhiere %	Inclinación 20°	38,3	31,7	33,4	31,2	24,8	45,8	34,7	56,0	36,0	34,7
Mineral que se adhiere %	Inclinación 25°	32,0	26,8	34,6	30,3	24,3	31,6	16,1	33,7	16,3	18,9

Después de realizar los experimentos en la pila 1, se pudo notar que los valores de adherencia, como se observa en la tabla 3.7 no presentan uniformidad de una humedad a otra, sino que tienen un comportamiento aleatorio que no se corresponde con la realidad física del proceso en la planta de preparación de mineral. Para lograr más representatividad de los resultados se tamizaron las muestras en aras de lograr una granulometría homogénea, la decisión estuvo fundamentada por la presencia de terrones de mineral que al caer sobre la placa de metal rodaban y no se adherían debido a la gran energía potencial y cinética que tenían independientemente de su humedad y la inclinación de la placa metálica.

La experimentación en la pila 2 se realizó con muestras tamizadas en un tamiz de 6,2 mm, en busca de una granulometría homogénea para realizar el experimento. Los valores obtenidos para la pila 2 se relacionan en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Comportamiento de la adherencia respecto a la variación de la humedad (pila 2).

Humedad (%)	Angulo de 20°				Angulo de 25°			
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 1		Muestra 2	
	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA	MA	MNA
38	187	11	188	19	134	58	154	61
36	146	24	141	12	101	31	100	33
34	156	22	169	20	120	30	143	34
33	144	25	150	20	128	64	126	77
30	212	35	204	26	155	77	147	69
29	165	44	131	29	148	67	142	96
27	194	54	210	39	60	122	32	160
25	175	34	124	25	55	113	75	126

A este experimento se realizaron cálculos análogos al de la pila 1, para obtener la cantidad de mineral que se adhiere por cada valor de inclinación del metal, los resultados se reflejan en la tabla 3.9

Tabla 3.9 Material que se adhiere para 20 y 25° de inclinación (pila 2).

Humedad	%	38	36	34	33	30	29	27	25
Mineral que se adhiere %	Inclinación 20°	91	86,3	86,9	85,3	85,3	78,8	80,5	81,7
Mineral que se Adhiere %	Inclinación 25°	70,5	72,4	78,0	63,4	66,2	62,9	22,7	34,8

Como se puede apreciar en la tabla 3.9 los resultados tienen mayor correspondencia, variando en la mayoría de las ocasiones en rangos admisibles. La tabla 3.9 muestra el comportamiento de la adherencia del mineral respecto a la variación del contenido de humedad, el cual se ilustra con mayor claridad en los gráficos correspondientes.

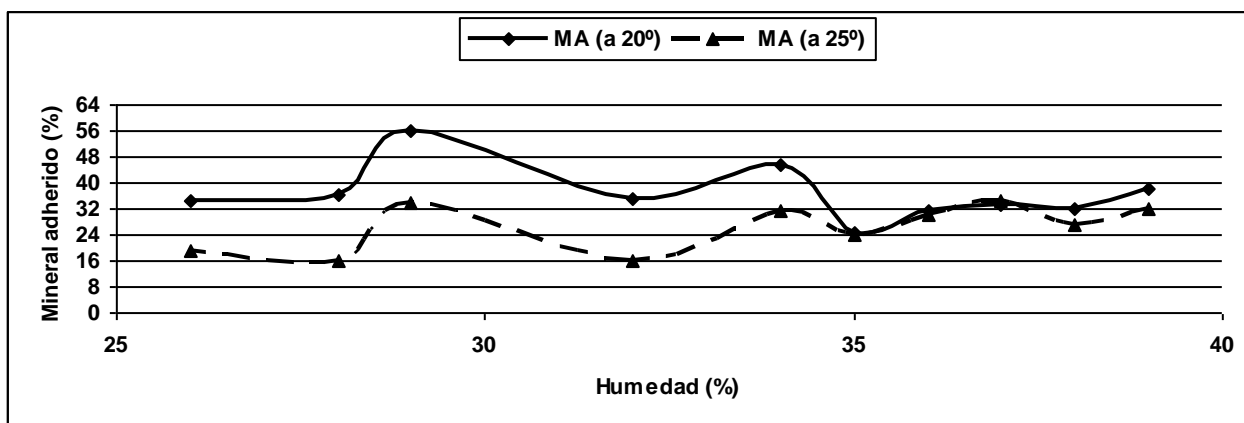


Figura 3.5 Comportamiento de la adherencia respecto a la humedad (pila 1).

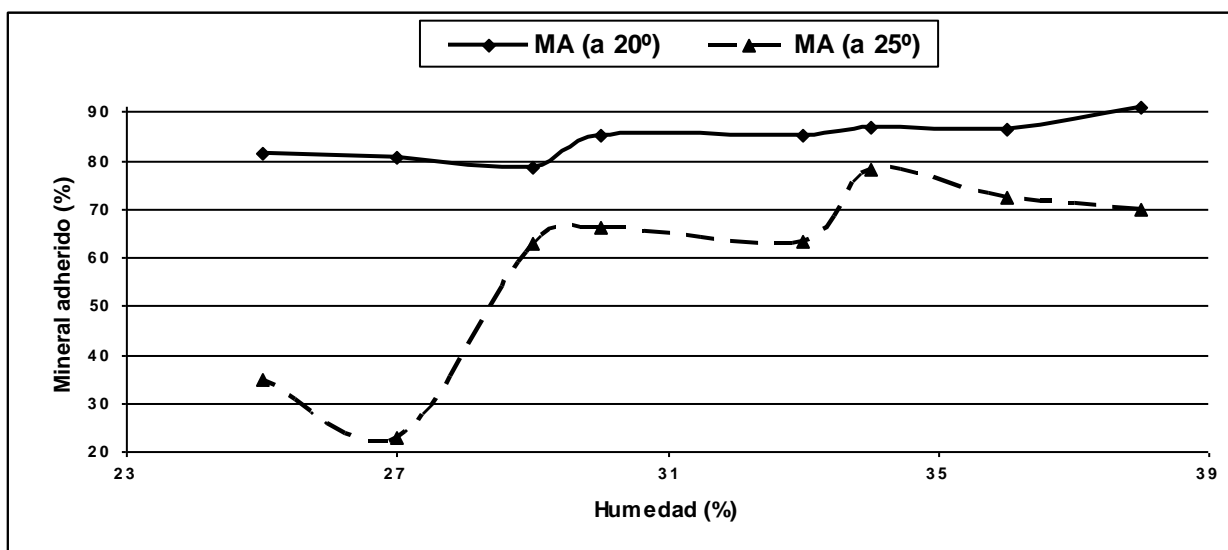


Figura 3.6 Comportamiento de la adherencia respecto a la humedad (pila 2).

En las figuras 3.5 y 3.6 se obtienen varios puntos de humedad donde el mineral tiende a aumentar o disminuir su valor de adherencia. Para determinar los rangos extremos de adherencia se estudiaron los puntos comunes en las figuras antes mencionadas (3.5 y 3.6), donde tienen lugar los valores extremos de este parámetro. Según los gráficos del experimento existen dos puntos que predominan en las figuras los cuales vienen dados por los valores 29 y 34% de humedad. A esas humedades es donde se obtienen los valores máximos de adherencia para las pilas 1 y 2. Lo anterior sugiere secar el material hasta una humedad diferente de estos valores. La adherencia mínima se obtiene alrededor del 27% de humedad.

3.5 Análisis de los impactos asociados a la implementación del secado solar natural del mineral laterítico a escala industrial

Diferentes investigadores (Estenoz, 1999b; Estenoz et al., 2004; 2008; Retirado, 2007) coinciden en que la implementación del proceso a escala industrial genera impactos económicos, sociales y ambientales, los mismos se analizan a continuación:

3.5.1 Impactos económicos

La disminución de la humedad del mineral laterítico antes de su entrada a los secaderos mediante la implementación del secado solar natural permite que las plantas de preparación de mineral operen con mayores flujos de producción, disminuyen los consumos de combustible y energía lo que permite elevar las eficiencias de las empresas y con ello maximizar los aportes al estado. Además con la innovación tecnológica en el secado solar del mineral laterítico se logran otros beneficios económicos, entre los que se destacan el mejoramiento de la homogenización de las menas abastecidas a las empresas Estenoz et al. (2008)

Con la implementación del secado solar en la Empresa René Ramos Latour se han logrado diferentes beneficios entre los que se encuentran:

- Se reducen las pérdidas de mineral unidas al rechazo
- Aumento de la productividad del transportador

- Transportación de menos agua en los vagones a la industria
- Menor carga circulante en los vagones y se evita echarle agua al mineral para despegarlo de los vagones
- Se reducen los tiempos perdidos en los secaderos por los alimentadores tupidos producto de la adherencia del mineral
- Se incrementa la productividad de los secaderos por la ampliación de la superficie de contacto entre el mineral laterítico y los gases dentro de los mismos.
- Se incrementa la productividad de los molinos al pasar menos mineral fino con el material granulado
- Aumenta la estabilidad y del abasto y la homogeneización de las menas al proceso y con ello se produce mas níquel con la misma cantidad de materia prima y a un menor costo de producción
- Se redujo el consumo de combustible en el proceso de secado.

3.5.2 Impactos sociales

La introducción de la tecnología del secado solar para el mineral laterítico permite humanizar la labor de los operadores de los secaderos ubicados en la planta de preparación de mineral, mejorar ostensiblemente el entorno laboral y disminuir las emisiones gaseosas hacia los puestos de trabajo y los barrios residenciales, aumentando la calidad del aire, lo que conlleva a la disminución de los problemas respiratorios en las personas que viven en las comunidades mineras cercanas a las empresas productoras de níquel.

Otro aspecto positivo lo representa la posibilidad de obtener mejores índices de producción y con ello una mayor estimulación a los obreros al poder cumplir exitosamente los planes de producción, lo que repercute favorablemente en las familias de los trabajadores ya que se incrementa su poder adquisitivo y por ende se eleva el nivel y la calidad de vida de los mismos y sus familiares.

3.5.3 Impactos ambientales

El proceso estudiado daña poco al medio ambiente, debido a que el mismo utiliza las energías solar térmica y eólica como fuentes de secado. Con la implementación del secado solar natural del mineral laterítico se reducen las emanaciones de gases producto de la combustión (CO, CO₂, SO₂ y otros gases tóxicos) liberados por los secaderos rotatorios, debido a que el tiempo de permanencia del mineral dentro de los mismos se reduce y el consumo específico de combustible decrece considerablemente. Teniendo en cuenta que estos gases son perjudiciales para la vida de los seres humanos y las plantas se infiere que la reducción de las emanaciones mejora la calidad del aire en el entorno laboral y en los barrios cercanos a las empresas, lo que repercute en la disminución de los niveles de contaminación de las aguas y en la supervivencia de los ecosistemas de los territorios aledaños. A pesar de los beneficios medioambientales asociados al secado solar natural del mineral laterítico, durante el desarrollo del proceso existe una afectación constante al medio ambiente y los trabajadores en el patio de secado provocadas por las emanaciones de polvo y ruido que se generan en el proceso de carga, descarga y remoción del mineral (Retirado, 2007; Estenoz et al., 2008).

3.6 Resumen de los beneficios derivados de la implementación del secado solar natural del mineral laterítico en la empresa René Ramos Latour de Nicaro

3.6.1 Influencia del secado solar en el consumo de combustible

La Tabla 3.10 representa el comportamiento del consumo de combustible en función de la humedad de entrada del mineral laterítico a los secaderos para el periodo enero-junio de los años 2011 y 2012 y en el Anexo 6 se expone la dependencia entre el consumo específico de combustible y la humedad del mineral.

En el primero de los años considerados se alimentó las menas en condiciones naturales sin secado solar, en el segundo el mineral fue

sometido al proceso y con ello se redujo su humedad en 1,21% (como promedio) respecto al mismo periodo del año anterior.

Tabla 3.10 Incidencia de la humedad de las menas en el consumo de combustible

Año 2011	Humedad de entrada	Plan de consumo	Consumo real de combustible	Diferencia
Sin		de combustible		entre ambos
secado solar	%	(t)	(t)	(t)
Enero	36,82	2768	3743	975
Febrero	34,98	3288	3694	406
Marzo	35,10	3395	3896	501
Abril	36,57	3656	3796	140
Mayo	36,40	3489	3524	35
junio	36,24	3719	3732	13
Total	36,01	20315	22385	2070
Año 2012 (Con secado solar)				
Enero	35,76	2842	3457	615
Febrero	37,96	3110	3502	392
Marzo	37,43	3180	3548	368
Abril	36,04	3540	3751	211
Mayo	31,85	3490	3478	-12
junio	30,35	3580	3301	-279
Total	34,8	19742	21037	1295
Diferencia	1,21	573	1348	

Como se aprecia en la Tabla 3.6 existe un consumo de petróleo en los primeros seis meses del año 2011 igual a 22385 toneladas determinado en gran medida por la alta humedad de las menas, lo anterior eleva los costos de producción y reduce considerablemente las utilidades que se pueden obtener de la explotación eficiente de los secaderos. Sin embargo, al aplicarle el secado solar natural al mineral laterítico para el mismo periodo del 2012 se obtuvo un consumo igual a 21037 toneladas y por consiguiente un ahorro de 1348 toneladas de petróleo equivalente en ganancias a 443,492 CUC, teniendo en cuenta que el precio de combustible reportado por el departamento de economía energética para este periodo es de 329 CUC/t de petróleo. Estos comportamientos demuestran la factibilidad económica de la

implementación del secado solar natural para el material analizado. En el área de la extracción y transporte se obtienen impactos positivos, los mismos se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Impacto en el área de la extracción y transporte de la implementación del secado solar natural del mineral laterítico.

Carga circulante improductiva durante la extracción de mineral						
Sin secado Solar	Extracción Por viajes	Extracción por balance	Humedad del mineral	Carga circulante	Carga improductiva	Combustible perdido
Año 2011	(t)	(t)	(%)	(t)	(%)	(l)
Enero	213 568	193 450	36,82	20 118	10,4	40 236
Febrero	147 784	138 070	34,98	9 714	7,03	19 428
Marzo	107 968	101 830	35,10	6 138	6,03	12 276
Abril	139 222	132 580	36,57	6 642	5,01	13 284
Mayo	151 097	138 580	36,40	12 517	9,03	25 034
Junio	155 234	142 816	36,24	12418	8,60	20 416
Total	914 873	847 326	36,01	67 547	7,90	130 624

Carga circulante improductiva durante la extracción de mineral						
Con secado Solar	Extracción Por viajes	Extracción Por balance	Humedad del mineral	Carga circulante	Carga improductiva	Combustible perdido
Año 2012	(t)	(t)	(%)	(t)	(%)	(l)
Enero	116 910	108 150	35,76	8 760	8,1	17 520
Febrero	64 298	60 430	37,96	3 868	6,4	7 736
Marzo	105 387	99 610	37,43	5 777	5,8	11 554
Abril	89 676	86 310	36,04	3 366	3,9	6 732
Mayo	94 495	87 740	31,85	6 755	7,7	13 510
Junio	98 516	91 410	30,35	7106	7,7	13512
Total	569 282	533 650	34,8	28 526	6,38	57 052
Diferencia	345 591	313 676	1,21	39021	1,52	73 572

Al valorar los resultados mostrados en la Tabla 3.11 se observa una reducción del combustible perdido por concepto de recirculación del material como consecuencia de la implementación del secado solar que asciende a 73572 litros para el periodo enero-junio. La distribución por meses, comenzando por enero fue de 22 716; 11 692; 722; 6 552; 11 524; y 6904

litros respectivamente, de la misma se observa que los ahorros más significativos se obtuvieron en los meses enero, febrero y mayo. Estos comportamientos aunque no están determinados únicamente por la reducción de la humedad producto del secado solar si están influenciados por la aplicación del proceso.

En el mes de abril debido a la implementación del secado solar y a la preparación del mineral desarrollada durante los tres meses precedentes en el depósito se alcanzó una productividad de 51 toneladas por vagón de las 34 que se tiene planificada. Lo que produjo un incremento de 29 049 toneladas de mineral laterítico transportadas que equivalen a un ahorro de 16 800 litros de diesel mensual aproximadamente por concepto de transporte de las Locomotoras que consumen alrededor de 400 litros por cada viaje que realizan desde la empresa René Ramos Latour hasta la mina de Pinares de Mayarí. Además se redujeron los costos asociados al mantenimiento de las locomotoras y los vagones.

Los ahorros de combustible en las diferentes áreas de la empresa (secaderos, extracción y transporte) además de los beneficios económicos que generan, también tienen asociados impactos medioambientales favorables, por cuanto el combustible ahorrado no se combustiona en los secaderos rotatorios y por tanto se reducen las emanaciones de gases nocivos productos de la combustión de combustibles fósiles.

En el presente trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones de los agentes contaminantes porque en la empresa no se han realizado estudios ambientales que recojan los valores de las emanaciones de gases productos de la combustión, polvo y ruido, pero en general se implementan estrategias ambientales para mitigar los impactos negativos del proceso metalúrgico de obtención de níquel porque se conoce que el polvo afecta directamente en mayor o menor medida al organismo humano y que los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo para la vida de los seres humanos ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

3.6.2 Influencia en la productividad de los secaderos

En estudios realizados con anterioridad se demostró que la limitante fundamental para la productividad de los secaderos de menas lateríticas es el aporte de calor (Aldana et al, 2004) y que se puede elevar la productividad a través de un incremento del coeficiente de utilización de los secaderos y la disminución de la humedad usando el secado solar previo de las menas, aspecto al que se han referido otros investigadores (Estenoz, 2001; Estenoz y Pérez, 2001; Retirado 2007).

Relacionando los resultados de humedad y consumo específico en los primeros meses de este año con la productividad de la planta, se ve claramente los efectos positivos de la disminución de la humedad, reduciéndose el consumo específico e incrementando la productividad promedio diaria de la planta desde 3054 t/día en el mes de febrero hasta 3613 t/día en mayo, como puede apreciarse en la figura 3. 6 y en la tabla 3.12, en los primeros 25 días de junio la productividad continua creciendo hasta 3635 t/día superior a los primeros cinco meses del año y los valores de humedad y consumo continúan decreciendo. Alta humedad del mineral provoca tupiciones en las tolvas de los alimentadores por la adherencia del mineral provocando vacíos en los secaderos lo que conlleva a disminuir la productividad y aumentar el consumo de petróleo, además cuando las tolvas se tupen se realizan malas operaciones ya que los operarios violan lo establecido echándole agua para destupirlas con una manguera a presión. Esto influye en la eficiencia metalúrgica.

Tabla 3.12 Humedad del mineral de entrada, consumo específico de combustible y productividad promedio diaria en la planta de preparación de mineral de la ECRRL en los primeros meses del 2012.

Año 2012	Humedad de entrada (%)	Consumo Específico de Pet. (Kg/t)	Productividad (t min/día)
Enero	35.76	37.76	2958
Febrero	37.96	40.19	3054
Marzo	37.43	37.48	3090
Abril	36.04	35.70	3503
Mayo	31.85	30.97	3613
Hasta 25 Junio	30.35	29.89	3635

Los resultados industriales corroboran que hay una reducción de la humedad hasta 30.35 %, valores inferiores de 33 % y los consumos de petróleo han disminuido a 29.89 kg/t valor inferior a 30.0 kg/t.

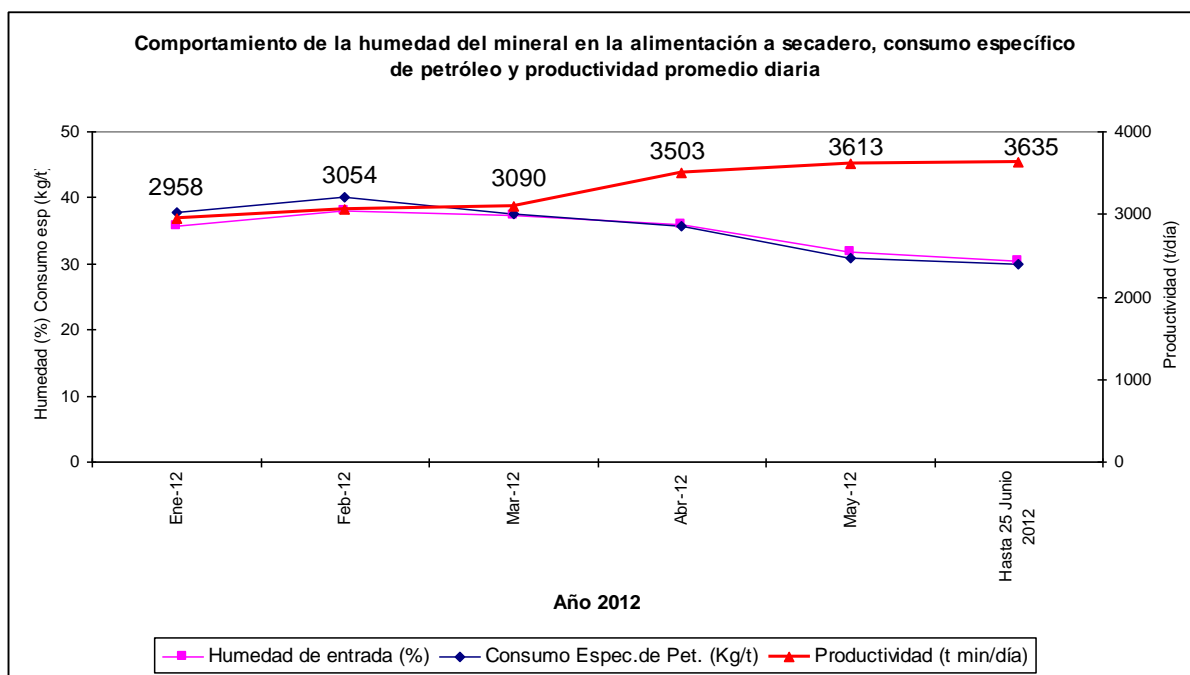


Figura 3.7 Comportamiento de la humedad, consumo específico y productividad promedio diaria de los primeros meses del año 2012.

En la figura 3.8 se observa la relación de la humedad del material con respecto a la productividad y como esta va influyendo, al disminuir la humedad de 35.01% en el 2011 hasta 30.74% en junio del 2012, al mismo tiempo se incrementa la productividad desde 38.42 hasta 50.25 t/h.

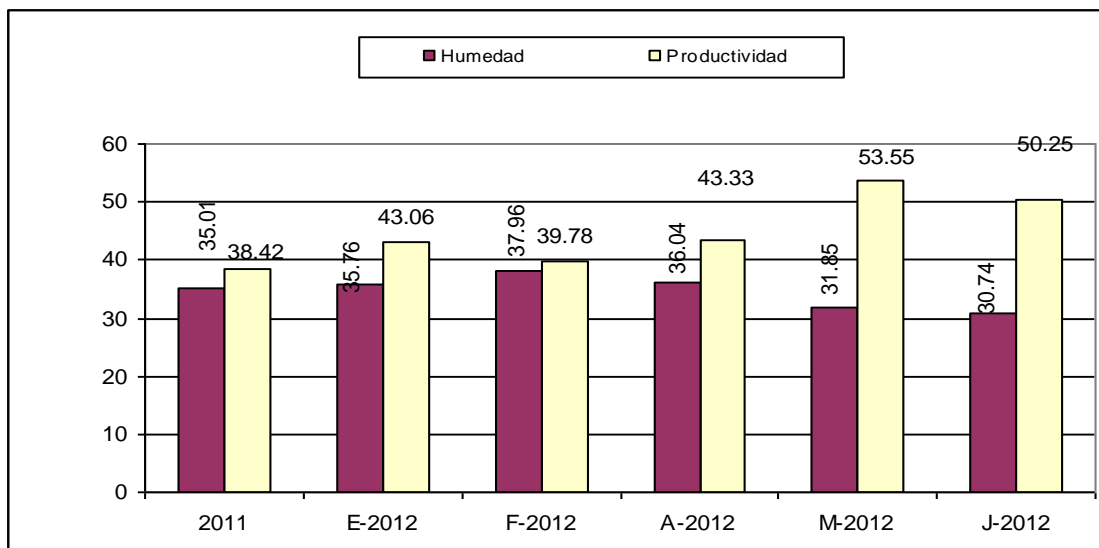


Figura 3.8 Comparación entre la humedad y la productividad de los secaderos antes y después del secado solar.

La influencia de la humedad en la productividad de los secaderos esta determinada por la ampliación de la superficie de contacto entre el mineral laterítico y los gases dentro de los mismos.

3.7 Conclusiones del capítulo

- Se demostró la influencia que tienen los parámetros climatológicos en el proceso de desorción de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico a partir del establecimiento de los gráficos de comportamiento, de ellos se infiere que las precipitaciones es el parámetro que más afecta el desarrollo del proceso a la intemperie.
- Los valores obtenidos en el estudio de la adherencia indican que la misma tiene un comportamiento aleatorio respecto al contenido de humedad y está determinada por la granulometría del mineral, la velocidad y la altura a la que sea descargado.
- Se demostró estadísticamente la influencia que tiene la humedad del mineral en la productividad de los secaderos logrando un aumento de 11,83 t/h.
- Una reducción de la carga circulante improductiva en el sistema de transporte por ferrocarril en 39021 t y del combustible asociado que decreció de 130 624 a 57 052 litros. Además se incrementó la productividad del referido sistema de transporte de 34 a 51 t/vagón lo que proporcionó un ahorro de combustible entre 16 500 y 17 000 l/mes.

CONCLUSIONES GENERALES

- La implementación del proceso de secado solar natural del mineral laterítico a escala piloto evidenció que es posible su generalización a escala industrial. Se lograron reducciones en el contenido de humedad de los minerales lateríticos que ascendieron a 7,48 y 11,87% respectivamente.
- Se demostró que el secado solar tiene una influencia significativa en la reducción del consumo de petróleo durante el secado térmico convencional del material con un ahorro de 1348 toneladas de petróleo en el período estudiado, equivalentes en ganancia a 443 492 CUC y un incremento de la productividad de la planta de secaderos de 38,4 a 50,25 t/h.
- La implementación del proceso, a escala industrial, provocó impactos económicos, sociales y ambientales, en general positivos. Se redujeron las emanaciones de CO, CO₂, SO₂ y otros gases tóxicos producto de la combustión de petróleo en los secaderos convencionales.

RECOMENDACIONES

- Profundizar en el estudio de la temática por la importancia que tiene para la industria cubana del níquel, a partir de la realización de investigaciones que contemplen nuevos aspectos y variantes tecnológicas no valoradas en el trabajo.
- Emplear información científico-técnica establecida en la tesis en la realización de actividades académicas en cursos de pregrado y postgrado, así como, en la capacitación del personal que trabaja en las plantas de preparación de minerales de las empresas del níquel.

Bibliografía

1. 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.
2. Abdel-Rehim, Z.; Z. Nagib. Solar drying of Bagasse Pulp. *Journal of Applied Sciences Research*, 2007, 3(4): 300-306.
3. 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.
4. Anwar, S.; G. Tiwari. Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42 (2): 627-637.
5. 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.
6. Berruta, L. Participación campesina en el diseño y construcción de un secador solar para café. *Agrociencia*, 2004, 37 (1): 95-106.
7. Condorí, M.; R. Echazú, L. Saravia. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renewable Energy*, 2001, 22(4): 447-460.
8. Corvalan, R.; M. Horn; R. Roman; L. Saravia. *Ingeniería del secado*

solar. CYTED-D, 1995.

9. Durán, R. *Estudio de las propiedades físico mecánicas del mineral laterítico*. Tesis de Ingeniería. ISMM. 2006. 62 p.
10. Ekechukwu, O.; B. Norton. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 1999, 40(6): 615-655.
11. Esper, A.; W. Mühlbauer. Solar drying-an effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 1998, 15(1-4): 95-100.
12. Espinosa, M.; N. Pérez. *Evaluación del estado técnico de las muestras extraídas y depositadas en áreas de la Mina de la empresa Ferroníquel Minera, para los trabajos de secado solar y homogenización*. Informe presentado en el Consejo Técnico de la empresa Ferroníquel Minera S.A, 2010. 30 p.
13. Estenoz S.; A. Alderí; N. Batista; A. Donatién. *Resultados en la industria minera del secado solar y la homogeneización de minerales en pilas a la intemperie*. Santiago de Cuba. En: Memorias en CD del Evento CIEMA'05, 2005, Noviembre 8-11, ISBN 959-2007-198-5.
14. Estenoz, S.; A. Mejías; A. Donatién; A. Adherí; A. Díaz; A. Cutiño; F. Bove; M. León. *Uso racional de los recursos con la explotación de los depósitos de secado solar y estabilización de la calidad en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. En: Convención Internacional de Ingeniería en Cuba, Cienfuegos. 2008.
15. Estenoz, S. Desarrollo sostenible en la minería a través del aprovechamiento integral de los yacimientos lateríticos. *Tecnología Química*, 2001, 21(3): 54-60.
16. Estenoz, S. *Evaluación de las tecnologías de explotación de depósitos mineros para mezclas, beneficio, homogeneización y secado solar en la mina de la empresa Ernesto Che Guevara*. Informe Técnico, 2007a. 46 p.
17. Estenoz, S. *Incremento y regulación de la eficiencia económica del complejo minero-metalúrgico*. Centro de Investigaciones del Níquel:

Informe final del proyecto SEMMI, 1999b, 93 p.

18. Estenoz, S.; M. Espinosa; N. Pérez. *Uso de energías renovables en la industria cubana del níquel*. En: Memorias del evento CUBASOLAR. Guantánamo. 2004.
19. Estenoz, S.; N. Pérez. *Procedimiento de homogeneización y secado solar de materiales a granel e instalación requerida*. OCPI. Fecha de solicitud: 2001. Cuba, patente de invención No. 208.
20. 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.
21. Fayett, D. *Optimización del proceso de secado solar para Lodos Residuales y cuantificación de metales pesados*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. 2008. 46 h.
22. Ferreira, S.; A. Costa. Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica*, 2009, 20(2): 89-104.
23. Ferro, V.; S. Fonseca; J. Abdala; A. Torres; J. Pantoja; C. Bergues; P. Griñán; G. Ibáñez. Análisis de opciones para el secado solar de café. Aspectos cinéticos (Parte I). *Tecnología Química*, 1999, 19(3): 18-25.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

28. Guerra, C.; A. Menéndez; R. Barrera; E. Egaña. Estadística. La Habana: Editorial Félix Varela, 2003. 376p.
29. Gigler, J.; W. Van Loon; C. Sonneveld. Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(6): 507-514.
30. Gógüs, F.; M. Maskan. Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(4): 378-382.
31. Gutiérrez, R. Influencias de las Características del Mineral Laterítico en los Índices de Explotación de los camiones articulados VOLVO A40D y A35C en la Empresa comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2003. 60p.
32. Guzmán, J. *Diseño de experimentos para Ingenieros Mecánicos*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1986.
33. Hernández, J.; P. Quinto; J. Cuevas; R. Acosta; J. Aguilar. Estudio del secado de Capsicum Annuum L (Chile Jalapeño) a través del modelo de Luikov. *Caos Conciencia*, 2008, 1:21-30.
34. Hollick, J. Commercial scale solar drying. *Renewable Engineering*, 1999, 16(1-4): 714-719.
35. Isachenko. V.; V. Osipova.; A. Sukomel. Transmisión del calor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1979. 566p.
36. Lykov, A. Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos. Editorial gostejizdat. Moscu, 1954.
37. Lykov, A. Teoría del secado. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968
38. Karathanos, V.; V. Belessiotis. Sun and artificial air drying kinetics products. *Journal of Food Engineering*, 1997, 31(1): 35-46.
39. Kallel, F.; N. Galanis; B. Perrin; R. Javelas. Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. J. Heat Transfer, ASME Trans, 1993.
40. Krisher, O. Fundamentos científicos de la técnica del secado. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.

41. Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana, 1969. 980p.
42. Leyva, A.; A. Díaz; O. Leyva; J. Trotman. *Etapas preliminar del secado solar del Carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas*. Informe de investigación, 2010. 10 p.
43. Mahmutoglu, T.; F. Emfr; Y. Birol. Sun solar drying of differently treated grapes and storage stability of dried grapes. *Journal of Food Engineering*, 1996, 29(3-4): 289-300.
44. Martínez-Pinillos, E. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. *Madera y Bosques*, 1997, 3(2): 13-28.
45. Medeiros, M.; A. Bartolomeu; R. Nogueira. Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products. *Journal of Food Engineering*, 2006, 73(4): 402-406.
46. Miranda, J. Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel. *Minería y Geología*, 1996, 13(2): 39-45.
47. Mitrofánov, S; L. Barski; V. Samygin. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir. Moscú, 1982. 439p.
48. Montero, I. *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Tesis Doctoral. Badajoz, 2005. 262h.
49. Montes, E.; R. Torres; R. Andrade; O. Pérez; J. Marimon ; I. Meza. Modelado de la cinética de secado de Ñame en capa delgada. *Ingeniería e investigación*, 2008, 28(2): 45-52.
50. Montoya, J.; E. Jiménez. Determinación de la curva de secado al aire libre mediante modelación matemática y experimental de la Guadua Angustifolia Kunth. *Scientia et Technica*, 2006, 12(30): 415-419.
51. Morsetto, J.; A. Lema; M. Pontin; G. Paisio. Estudio preliminar sobre la cinética de secado para Perejil en condiciones de secado solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2008, 12(8): 141-146.
52. Mwithiga, G.; J. Olwal. The drying kinetics of kale (brassica oleracea) in

- a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 2005, 71(4): 373-378.
53. Novoa, R.; M. Boizán. Secado de Zeolita a escala de laboratorio (III). *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, No.1: 24-29, 1995.
54. Pacheco, P; J. Suárez; E. Juliá. Secado solar de maderas. Perspectiva teórica. *Tecnología Química*, 2006, 26(3): 71-75.
55. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 4ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1967.
56. Perry, J. Chemical Engineering Handbook. 6ta Edición. Mc Graw Hill. New York, 1984.
57. Picado, A.; R. Mendieta; J. Martínez. Cinética de secado de la Levadura Cervecera. *Revista Científica Nexo*, 2006, 19(01):49-56.
58. Ramírez, Y. Influencia de los parámetros climatológicos en el secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2006. 52p.
59. Restrepo, A.; J. Burbano. Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia et Técnica*, 2005, 11(27): 127-132.
60. Reporte técnico anual de la empresa Comandante René Ramos Latour, 2009.
61. Reporte técnico anual de la empresa Comandante René Ramos Latour, 2010.
62. Reporte técnico de la mina de Pinares Este, 2010.
63. Retirado, Y. *Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico*. Tesis de Maestría. ISMM. 2007. 71h.
64. 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.
65. Retirado, Y.; E. Góngora; E. Torres; N. Hernández. *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.
66. 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.
67. Rezchikov, V.; A. Guinsburg. Secado de productos alimenticios en cama fluidizante. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
68. Romero, Y. Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, Moa, 2006. 55p.
69. Salinas, C.; R. Ananias; M. Alvear. Simulación del secado convencional de la madera. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 2004, 6(1): 1-20.
70. Santos, Y. Estudio a escala de laboratorio del proceso de secado solar natural de las menas lateríticas en la empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de Ingeniería. ISMM. 2005.
71. Saravia, L.; L. Zunino; R. Echazú. *Perfomance y diseño de secaderos-invernaderos de convección forzada*. En: V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables. Madrid. 1990.
72. Sierra, R. *Optimización energética en el diseño de los transportadores de bandas utilizados en la industria del níquel*. Tesis Doctoral. ISMM. 2010. 98 h.
73. Stewart, J. *Cálculo con trascendente tempranas*. 4 ed. La Habana: Editorial Félix Varela, 2009. 3 t.
74. Toirac Duran. R. Pronóstico del consumo de energía eléctrica en el hotel Porto Santo. Tesis de Maestría, 2010.
75. Tabio Gonzáles. G. Análisis de la información estadística de la planta de secaderos tomada entre Enero 2002 y Enero 2012.
76. Tiris, C.; N. Ozbalta; M. Tiris; I. Dincer. Thermal performance of a new solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1995, 22(3): 411-423.
77. Tiwari, G. *Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International, India, 2002.
78. Tiwari, G.; B. Sarkar. Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection. *Agricultural Engineering International*, 2006, 8(16): 1-9.

79. Tiwari, G.; S. Kumar; O. Prakash. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of Jaggery. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63 (1): 219–227.
80. Todd, F. Secado por aire y solar de la madera. Centro de agricultura de Louisiana State University. Estados Unidos, 2001.
81. Torres, E. *Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral en tambores cilíndricos rotatorios*. Tesis de Maestría. ISMM. 1999. 81h.
82. Torres, E.; R. Galano; E. Fernández; A. García. Comportamiento del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. *Minería y Geología*. 2000, 17(2): 73-77.
83. Torres, E.; R. Galano; E. Guzmán. Influencia del régimen de temperatura en el secado del mineral laterítico. *Minería y Geología*, 2003, 1(2): 119-123.
84. Touré, S.; S. Kibangu-Hkembo. Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. *Renewable Energy*, 2004, 29(6): 975-990.
85. Tunde-Akitunde, T.; T. Afolabi; B. Akintunde. Influence of drying methods on drying of bell-pepper. *Journal of Food Engineering*, 2005, 68(4): 439-442.
86. Türk, I. Determination of convective heat transfer coefficient of various crops under open sun drying conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2003, 30(2): 285-294.
87. Treybal, R. Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII./pág 653. 1985.

Anexos

Anexo 1

Humedad de entrada y Consumo específico de petróleo desde el 2004 hasta junio del 2012.

Año	H. Entrada	C.Espe.Kg/t
2004	29,34	27,70
2005	31,12	30,40
2006	31,98	33,26
2007	32,97	37,06
2008	32,80	34,91
2009	32,54	35,45
2010	34,99	39,69
2011	35,01	36,21
2012-Enero	35,75	37,76
2012-Febrero	37,96	40,19
2012-Marzo	37,43	37,48
2012-Abril	36,04	35,70
2012-Mayo	31,85	30,97
2012-Junio	30,35	29,89

Anexo 2

Comportamiento porcentual de la granulometría al variar la humedad del mineral.

Réplicas	Clases (mm)	Humedad en %			
		40	38	34	30
1	+75	7,60	9,1	18,367	1,2
	-75 +50	7,32	7,67	4,082	4,32
	-50 +25	12,45	11,98	10,204	7,93
	-25 + 0	72,67	71,31	67,347	86,55
2	+75	9,10	11,724	14,545	2
	-75 +50	8,50	4,828	6,818	5,921
	-50 +25	12,19	7,586	10,455	7,895
	-25 + 0	69,69	75,862	68,182	84,184
3	+75	8,760	14	13,131	1,52
	-75 +50	9,30	7,2	5,051	5,2
	-50 +25	12,02	10,44	11,616	8,4
	-25 + 0	69,80	69,14	70,202	85,28
4	+75	7,04	9,46	12,787	2,08
	-75 +50	6,76	8,37	3,442	5,02
	-50 +25	12,93	12,88	10,704	8,23
	-25 + 0	73,27	69,29	73,067	84,67
5	+75	8,14	11,884	11,685	1,48
	-75 +50	8,98	4,828	6,298	6,841
	-50 +25	11,77	7,806	11,375	7,575
	-25 + 0	71,11	75,482	70,642	84,104
6	+75	9,62	14,42	9,971	0,66
	-75 +50	8,74	7,5	5,071	4,78
	-50 +25	11,64	11,18	11,176	7,68
	-25 + 0	70	66,9	73,782	86,88
7	+75	6,48	8,46	9,747	2,6
	-75 +50	7,34	7,81	5,682	4,72
	-50 +25	13,47	12,68	10,844	8,09
	-25 + 0	72,71	71,05	73,727	84,59
8	+75	7,78	12,464	9,505	0,7
	-75 +50	8,48	3,868	6,958	6,981
	-50 +25	11,47	7,326	10,815	8,275
	-25 + 0	72,27	76,342	72,722	84,044
9	+75	9,28	14,42	14,351	1,18
	-75 +50	8,66	6,64	4,671	4,7
	-50 +25	10,72	11,28	10,936	7,24

	-25 + 0	71,34	67,66	70,042	86,88
10	+75	6,06	9,1	11,187	2,6
	-75 +50	8,28	7,43	6,262	4,72
	-50 +25	13,43	13,38	13,264	9,01
	-25 + 0	72,23	70,09	69,287	83,67
Promedio	+75	7,986	11,5032	12,5276	1,602
	-75 +50	8,236	6,6144	5,4335	5,3203
	-50 +25	12,209	10,6538	11,1389	8,0325
	-25 + 0	71,509	71,3126	70,9	85,0852

Anexo 3

Humedad del mineral a las 8:00 am cuando se riega y a las 4:00 pm cuando se recoge.

Fecha	08:00 a.m.	04:00 p.m.	Promedio		
			Tbh	Tamb	HR
01/02/2012	38,0	33,0	23,6	26,7	83,1
08/02/2012	46,0	41,0	23,3	27,3	77,8
	32,0	27,0	23,3	27,3	77,8
10/02/2012	30,0	25,0	24,3	27,4	83,0
13/02/2012	36,0	30,0	20,0	23,0	83,0
17/02/2012	34,0	30,0	23,4	26,9	80,5
20/02/2012	39,0	29,0	22,9	28,2	71,3
22/02/2012	38,0	28,0	24,3	28,0	79,8
24/02/2012	35,0	24,5	24,4	28,0	80,4
27/02/2012	27,0	23,0	23,8	27,8	78,1
	20,0	16,0	23,8	27,8	78,1
28/02/2012	24,0	18,0	23,8	27,0	82,6
02/03/2012	32,0	22,0	24,0	28,6	74,9
06/03/2012	44,0	40,0	24,5	27,9	81,5
07/03/2012	45,0	40,0	24,0	28,4	75,9
08/03/2012	40,0	36,0	23,5	27,5	78,0
12/03/2012	39,0	36,0	23,1	27,0	78,5
14/03/2012	39,0	31,0	23,2	27,8	74,8
16/03/2012	43,0	38,0	23,0	27,1	77,4
	42,0	40,0	23,0	27,1	77,4
19/03/2012	41,0	35,0	23,1	27,4	76,3
20/03/2012	40,0	32,0	23,3	27,0	79,7
21/03/2012	37,0	30,0	23,6	27,4	79,1
22/03/2012	39,0	35,0	22,4	26,2	79,0
23/03/2012	31,0	26,0	23,3	27,3	78,0
26/03/2012	31,0	30,0	24,1	29,1	72,9
27/03/2012	36,1	32,7	23,9	27,9	78,1
	43,0	38,0	23,9	27,9	78,1
28/03/2012	38,0	32,6	23,2	27,8	74,8
	33,2	28,1	23,2	27,8	74,8
29/03/2012	36,7	32,1	24,2	28,2	78,1
30/03/2012	31,1	26,3	24,4	28,1	79,8
02/04/2012	34,9	29,9	24,7	28,3	80,4
03/04/2012	37,3	30,8	25,1	28,1	83,9
04/04/2012	31,5	26,3	24,4	28,0	80,4
05/04/2012	32,0	27,3	25,0	28,0	83,9
17/04/2012	29,1	23,0	23,3	25,5	88,6
	30,9	26,8	23,3	25,5	88,6
19/04/2012	33,8	26,4	23,6	27,3	79,7
23/04/2012	32,4	24,8	24,1	29,6	70,4
25/04/2012	30,7	25,3	23,0	28,0	72,7
03/05/2012	35,8	31,2	25,0	28,0	83,9

07/05/2012	36,4	30,2	23,9	28,1	77,0
08/05/2012	34,5	32,2	23,4	27,8	75,8
09/05/2012	31,9	28,2	24,8	28,5	79,9
15/05/2012	31,0	24,6	26,0	29,9	78,9
16/05/2012	33,2	25,6	26,6	29,0	87,7
17/05/2012	27,9	21,0	25,9	29,0	83,4
18/05/2012	29,3	22,0	26,4	29,8	81,8
22/05/2012	28,0	21,3	25,9	28,5	86,4
23/05/2012	28,2	25,0	26,1	29,3	82,9
24/05/2012	26,2	23,5	26,1	30,5	76,3
28/05/2012	31,2	26,6	26,5	29,3	85,2
29/05/2012	27,6	21,6	26,7	29,3	86,5
30/05/2012	25,8	23,0	26,8	29,1	88,3
31/05/2012	27,7	23,6	27,0	29,8	85,3
01/06/2012	34,2	31,2	27,	30,3	82,4
04/06/2012	33,5	25,2	27,3	30,6	82,4
05/06/2012	27,1	22,9	27,0	31,0	78,5
06/06/2012	29,4	22,8	26,8	30,6	79,6
07/06/2012	28,5	23,1	26,6	30,4	79,6
08/06/2012	25,4	21,3	27,2	31,1	79,1
14/06/2012	31,7	26,8	26,2	29,6	81,7
15/06/2012	29,7	25,6	27,2	30,6	81,9
Promedio	33,5	28,2	24,5	28,2	79,9
Máximo	46,0	41,0	27,3	31,1	88,6
Mínimo	20,0	16,0	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	5,5	5,6	1,5	1,4	4,1

Anexo 4

Humedad del mineral cuando se riega a las 8:00 am y toma de muestra a la 1:00 pm después de cinco horas de secado solar.

Fecha	08:00 a.m.	01:00 p.m.	Promedio		
			Tbh	Tamb	HR
01/02/2012	38,0	37,0	23,6	26,7	83,1
08/02/2012	46,0	42,0	23,3	27,3	77,8
	32,0	28,0	23,3	27,3	77,8
10/02/2012	30,0	29,0	24,3	27,4	83,0
13/02/2012	36,0	34,0	20,0	23,0	83,0
17/02/2012	34,0	31,0	23,4	26,9	80,5
20/02/2012	39,0	35,0	22,9	28,2	71,3
22/02/2012	38,0	35,0	24,3	28,0	79,8
24/02/2012	35,0	33,0	24,4	28,0	80,4
27/02/2012	27,0	25,0	23,8	27,8	78,1
	20,0	19,0	23,8	27,8	78,1
28/02/2012	24,0	23,0	23,8	27,0	82,6
02/03/2012	32,0	29,0	24,0	28,6	74,9
06/03/2012	44,0	44,0	24,5	27,9	81,5
07/03/2012	45,0	42,0	24,0	28,4	75,9
08/03/2012	40,0	38,0	23,5	27,5	78,0
12/03/2012	39,0	36,0	23,1	27,0	78,5
14/03/2012	39,0	36,0	23,2	27,8	74,8
16/03/2012	43,0	41,0	23,0	27,1	77,4
	42,0	40,0	23,0	27,1	77,4
19/03/2012	41,0	38,0	23,1	27,4	76,3
22/03/2012	39,0	37,0	22,4	26,2	79,0
23/03/2012	31,0	30,0	23,3	27,3	78,0
26/03/2012	31,0	29,0	24,1	29,1	72,9
27/03/2012	36,1	34,3	23,9	27,9	78,1
	43,0	42,0	23,9	27,9	78,0
28/03/2012	38,0	37,0	23,2	27,8	74,8
	33,2	31,0	23,2	27,8	74,8
29/03/2012	36,7	35,0	24,2	28,2	78,1
30/03/2012	31,1	29,5	24,4	28,1	79,8
02/04/2012	34,9	33,1	24,7	28,3	80,4
03/04/2012	37,3	36,5	25,1	28,1	83,9
04/04/2012	31,5	28,8	24,4	28,0	80,4
05/04/2012	32,0	29,3	25,0	28,0	83,9
17/04/2012	29,1	26,9	23,3	25,5	88,6
	30,9	29,3	23,3	25,5	88,6
19/04/2012	33,8	32,2	23,6	27,3	79,7
23/04/2012	32,4	29,4	24,1	29,6	70,4
25/04/2012	30,7	28,2	23,0	28,0	72,7
03/05/2012	35,8	33,2	25,0	28,0	83,9
07/05/2012	36,4	33,8	23,9	28,1	77,0

08/05/2012	34,5	33,2	23,4	27,8	75,8
09/05/2012	31,9	31,2	24,8	28,5	79,9
15/05/2012	31,0	28,2	26,0	29,9	78,9
16/05/2012	33,2	31,5	26,6	29,0	87,7
17/05/2012	27,9	26,3	25,9	29,0	83,4
18/05/2012	29,3	27,2	26,4	29,8	81,8
22/05/2012	28,0	26,6	25,9	28,5	86,4
23/05/2012	28,2	26,7	26,1	29,3	82,9
24/05/2012	26,2	25,2	26,1	30,5	76,3
28/05/2012	31,2	28,8	26,5	29,3	85,2
Promedio	34,3	32,3	24,1	27,9	79,4
Máximo	46,0	44,0	26,6	30,5	88,6
Mínimo	20,0	25,2	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	5,5	3,9	1,2	1,2	4,2

Anexo 5

Humedad del mineral a las 8:00 am cuando se riega y a las 4:00 pm del mineral compactado.

Fecha	08:00 a.m.	Mineral compactado	Promedio		
			Tbh	Tamb	HR
10/02/2012	30,0	14,0	24,3	27,4	83,0
17/02/2012	34,0	15,0	23,4	26,9	80,5
20/02/2012	39,0	22,0	22,9	28,2	71,3
28/02/2012	24,0	10,0	23,8	27,0	82,6
18/05/2012	29,3	14,4	26,4	29,8	81,8
22/05/2012	28,0	15,3	25,9	28,5	86,4
23/05/2012	28,2	18,2	26,1	29,3	82,9
24/05/2012	26,2	12,9	26,1	30,5	76,3
28/05/2012	31,2	15,5	26,5	29,3	85,2
29/05/2012	27,6	15,6	26,7	29,3	86,5
30/05/2012	25,8	15,3	26,8	29,1	88,3
31/05/2012	27,7	16,3	27,0	29,8	85,3
01/06/2012	34,2	22,3	27,0	30,,	82,4
04/06/2012	33,5	20,2	27,3	30,6	82,4
05/06/2012	27,1	15,6	27,0	31,0	78,5
06/06/2012	29,4	18,0	26,8	30,6	79,6
07/06/2012	28,5	22,7	26,6	30,4	79,6
08/06/2012	25,4	20,2	27,2	31,1	79,1
14/06/2012	31,7	26,3	26,2	29,6	81,7
15/06/2012	29,7	23,3	27,2	30,6	81,9
Promedio	29,5	17,7	24,5	28.2	79,9
Máximo	39,0	26,3	27,3	31.1	88,6
Mínimo	24,0	12,9	20,0	23,0	70,4
Desv. Est	3.6	3,8	1,5	1,4	4,1

Anexo 6

Modelos que relacionan la humedad de las menas lateríticas con el tiempo de secado.

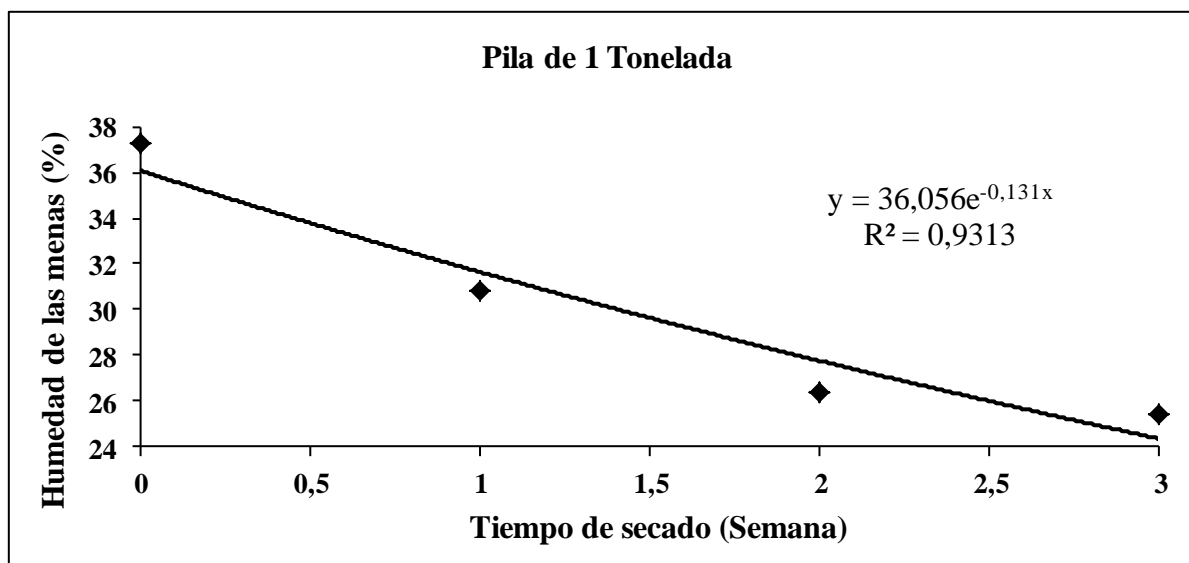


Figura 1. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.

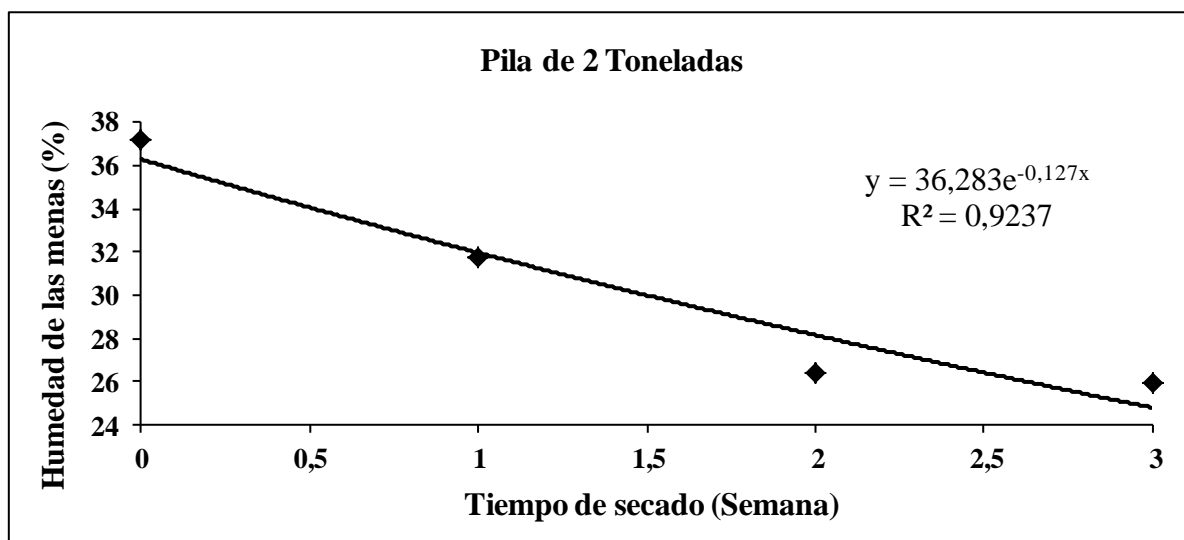


Figura 2. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.

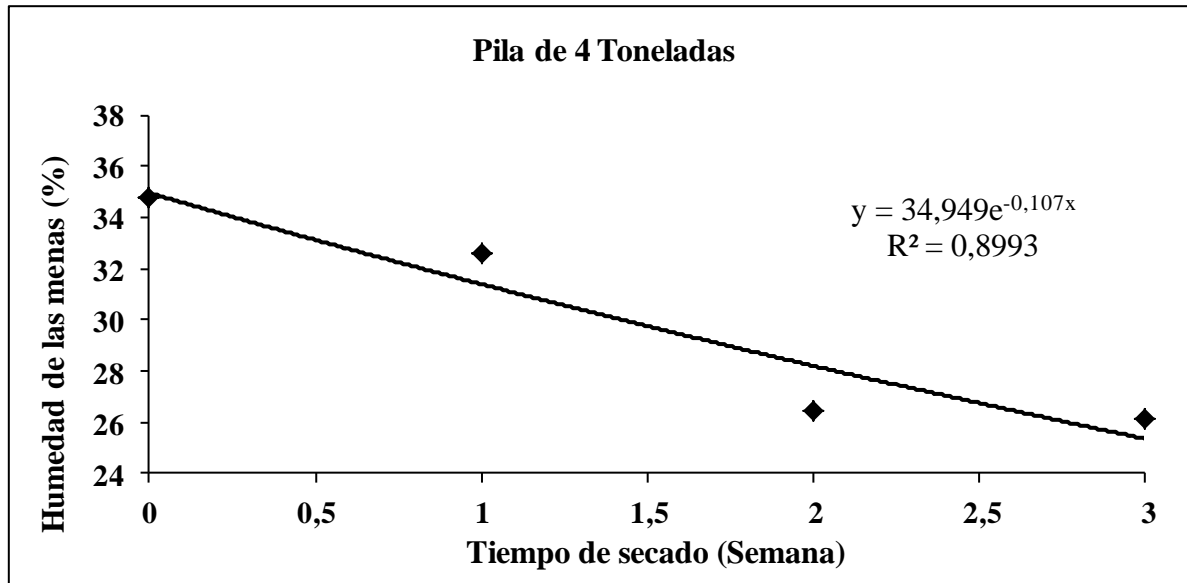


Figura 3. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.

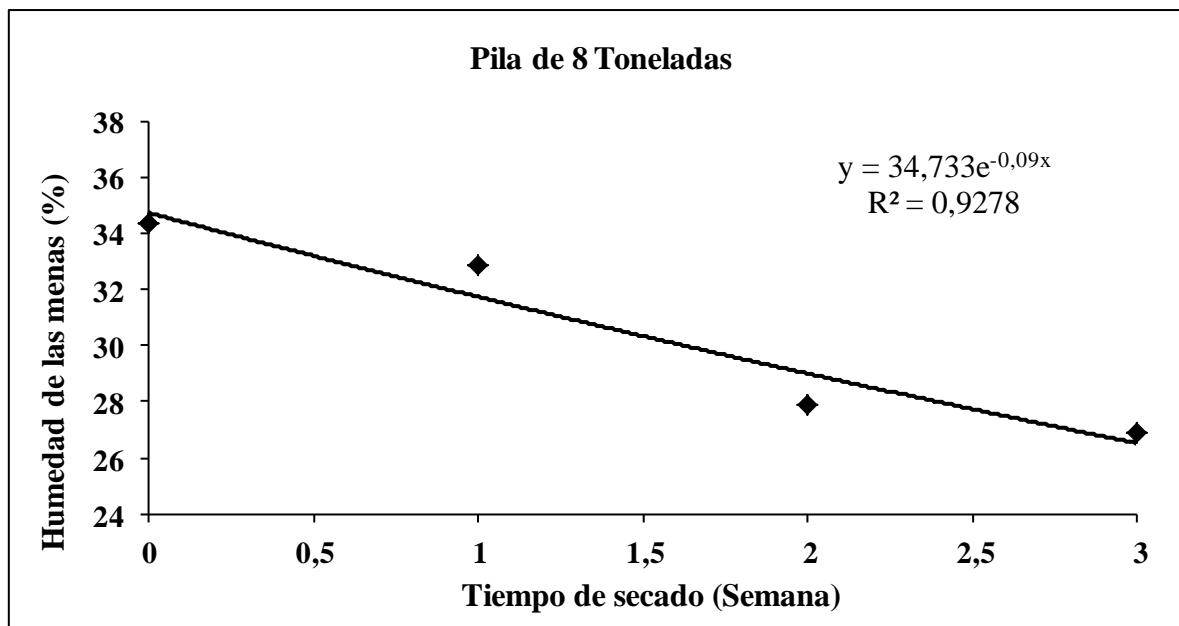


Figura 4. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.

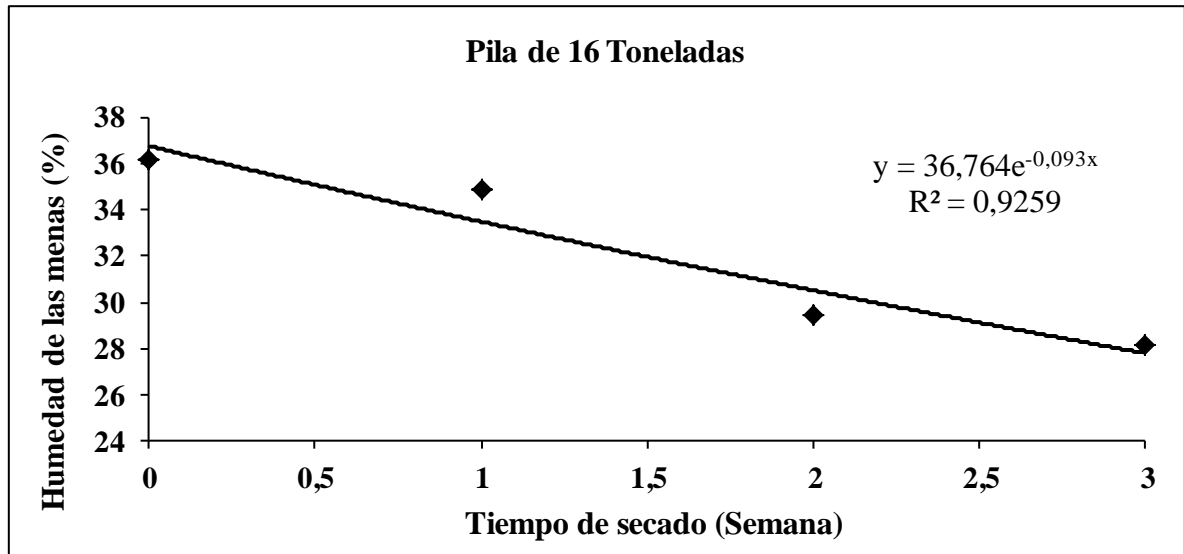


Figura 5. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.

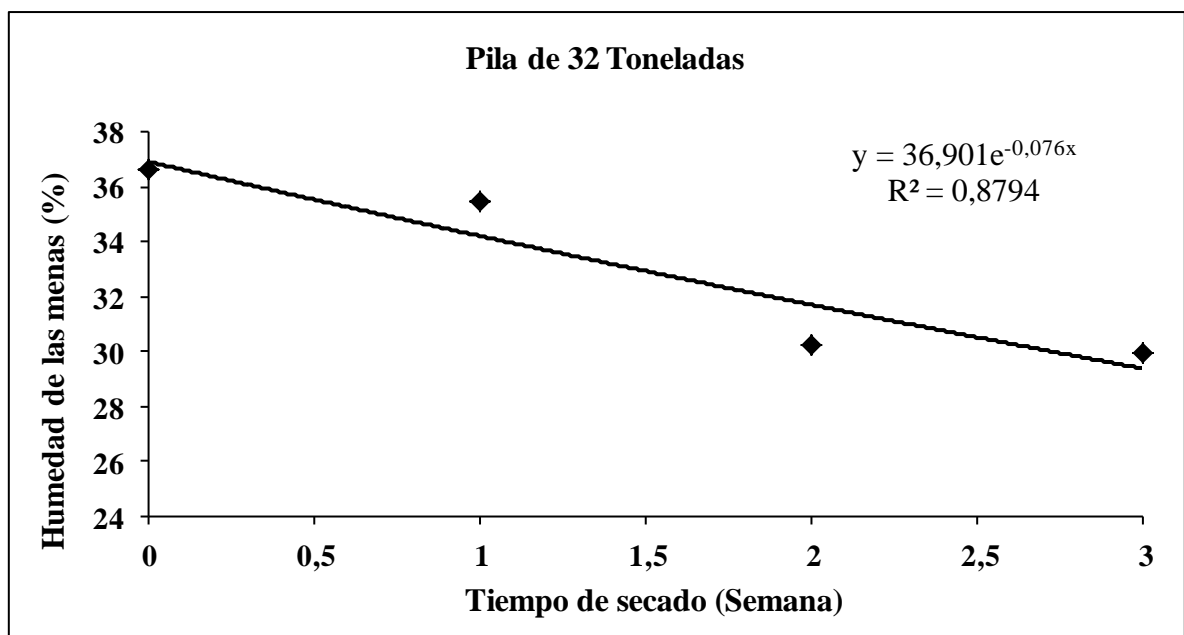


Figura 6. Dependencia de la humedad de las menas respecto al tiempo de secado.