

# REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

MARACAIBO - VENEZUELA



Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- Science Citation Index (SCIExpanded)
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci (online database)
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

# Mathematical model of heat and mass transfer for traditional patio solar drying of cocoa

<sup>1,2</sup>Juan Manuel Teixeira Da Silva, <sup>2</sup>Javier Antonio Cárdenas Oliveros

<sup>1</sup>Fundación Instituto de Ingeniería, Centro Ingeniería Mecánica. Carretera Nacional Hoyo de la Puerta, Baruta, Altos de Sartenejas. Caracas, Venezuela. Telf. 0058 212 9034610, juant@fii.gob.ve; <sup>2</sup>Universidad Politécnica del Estado Aragua Federico Brito Figueroa. Av. Universidad, La Victoria Estado Aragua, Venezuela. Telf. 0058 244 3231005, juan\_teixeira@upta.edu.ve;javier\_cardenas@upta.edu.ve

## Abstract

A model of heat and mass transfer to adjust the solar drying process of cocoa that is traditionally produced in the drying yard is presented, the input data are from the location of Chuao, Aragua State, Venezuela. The proposed method accelerates the drying process without altering the properties of the final grain, reducing the time of dehydration in 25 %. The simulation conducted indicates an obtainable air temperature value of 65 °C and relative humidity can be reduced up to 10 %, before the drying chamber. The model was compared with experimental data, noticing that the final conditions of cocoa obtained, correspond to the dehydrated approach to the traditional cocoa. Due to the use of a solar thermal store, the simulation indicates that cocoa can continue drying for two and a half hours after sunset.

**Key words:** simulation; drying; critical humidity; solar thermal store; evaporation.

# Modelo matemático de transferencia de calor y masa para el deshidratado solar tradicional en patio del cacao

## Resumen

Se crea un modelo de transferencia de calor y masa que permite ajustar el proceso de deshidratación solar del cacao que se produce tradicionalmente en los patios de secado, los datos de entrada son los de la localidad de Chuao, Estado Aragua, Venezuela. El método propuesto acelera el proceso de secado sin alterar las cualidades del grano final, reduciendo el tiempo de deshidratado en 25 %, la simulación realizada indica que pueden obtenerse valores de temperatura del aire de 65 °C y la humedad relativa se puede reducir hasta 10 %, antes de la cámara de secado. El modelo fue comparado con datos experimentales, observando que las condiciones finales del cacao obtenidas se corresponden con aproximación a las del cacao deshidratado de forma tradicional. Debido al uso de un almacenador térmico solar, la simulación indica que el cacao puede continuar su secado durante dos horas y media más, luego del ocaso.

**Palabras Clave:** simulación; secado; humedad crítica; almacenador térmico solar; evaporación.

## Introducción

El proceso de deshidratado del cacao puede efectuarse de forma natural (energía solar) o con otras fuentes de energía. Habitualmente el deshidratado es natural al sol [1], en patios de secado, exponiéndose al cacao al aire libre y la radiación solar directa, haciendo un uso más eficiente

de la energía para la evaporación del agua contenida en el grano [2].

El deshidratado natural al sol es afectado por factores relacionados con la temperatura ambiente, precipitaciones, velocidad del viento, humedad relativa del aire y el número de horas de sol aprovechables para el proceso. Dilip Jain et al. [3], indican que los problemas

asociados al deshidratado solar son: sobredeshidratación, deshidratación insuficiente, rehidratación por efectos de lluvia, decoloración debida a los efectos de la radiación ultravioleta y contaminación externa por: aves, insectos, microorganismos y humos.

Hasta el momento, se han desarrollado diversos modelos de deshidratadores solares, que permiten mejorar la eficiencia del proceso de deshidratación natural. Estas unidades de deshidratación solar normalmente calientan el aire mediante colectores solares planos antes de que éste ingrese a la cámara de secado. Abdulla et al. [4], afirman que las condiciones del aire influyen de manera importante en el rendimiento del deshidratador. Así mismo, Benhamou et al. [5] demostraron que el incremento de la temperatura del aire de secado, es el parámetro más influyente del proceso ya que conduce a un aumento en la humedad del aire a su salida del deshidratador. El uso de colectores solares planos para el calentamiento de aire es factible, ya que se pueden obtener temperaturas aproximadas de 80 °C en convección natural y 60 °C en convección forzada [6]. El deshidratado solar por convección natural sólo depende de la irradiación solar [7], por lo que se considera como una opción a ser utilizada en las zonas rurales donde el servicio de energía eléctrica es deficiente o inexistente.

Como la temperatura y humedad del aire varían en función de la insolación durante el día, se incluyó una unidad de “almacenamiento térmico” al modelo, con el objeto de reducir la intermitencia y estabilizar la temperatura y humedad del aire caliente a ser utilizado para el secado [8]. Aboul-Enein et al. [9], realizaron un estudio paramétrico de un calentador solar plano de aire, inclinado seguido de un almacenador térmico, utilizando materiales como arena, granito y agua, concluyeron que utilizando granito se obtienen temperaturas del aire más altas durante las horas de la noche.

El aporte del presente trabajo consiste en desarrollar un modelo analítico de transferencia de calor y masa, que permita ajustar el proceso de deshidratación solar del cacao producido tradicionalmente en el patio de secado de la localidad de Chuao, Estado Aragua – Venezuela, hasta alcanzar una curva de secado similar a la curva de secado experimental que corresponde a un grano de cacao de una calidad de aceptación nacional e internacional.

## Parte experimental

Para desarrollar el modelo analítico de transferencia de calor y masa que permita ajustar el proceso de deshidratación solar del cacao, se propuso una unidad de cuatro partes fundamentales: calentador solar de aire, almacenador térmico, cámara de deshidratado y chimenea (Figura 1).

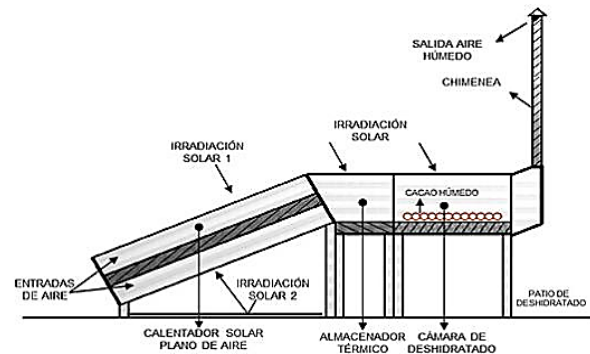


Figura 1. Unidad propuesta para deshidratación solar de cacao

### Calentador solar plano de aire

Formado por dos láminas de policarbonato: superior e inferior. La primera, recibe directamente la irradiación solar (Irradiación Solar 1) y la segunda, irradiación solar reflejada en una lámina de aluminio pulido apoyada en el suelo (Irradiación Solar 2). El centro del calentador se conforma por dos láminas (cuerpos negros); de aluminio ennegrecido, entre las que se ubica una placa de granito; así queda dividido en dos conductos iguales el espacio entre las láminas de policarbonato y cuerpos negros, a través de los cuales circula aire, por convección natural tomado del ambiente (entradas de aire).

### Almacenador térmico

El almacenador térmico consta de una lámina de policarbonato y una pieza de granito. El policarbonato expuesto a la irradiación solar directa (Irradiación Solar) transmite la radiación solar al granito modificando la energía interna de éste, cediendo calor al aire cuando su temperatura es mayor o absorbiendo calor cuando la temperatura del aire es mayor.

### Cámara de deshidratado

Está compuesta de una lámina de policarbonato (permite que los granos de cacao reciban irradiación solar transmitida) y un falso piso de cemento (de igual rugosidad al presentado por el piso del patio de secado), donde se coloca el cacao. Con esta configuración el cacao recibe energía solar directamente a través del policarbonato y además recibe energía por convección del aire previamente “tratado” en el calentador solar plano de aire y en el almacenador térmico. El uso del piso falso de cemento responde a la necesidad de remoción paulatina del mucilago que recubre al grano de cacao, fundamental para alcanzar la humedad final mínima necesaria.

## Chimenea

La chimenea permite un flujo de aire constante a través de las fases de calentamiento en el calentador, en el almacenador y en la cámara de deshidratado.

### Análisis térmico

La irradiación solar es la fuente primaria de energía para el proceso de deshidratado planteado. El policarbonato deja pasar una fracción de la irradiación solar (directa o indirecta) incidente sobre él. En el calentador solar plano de aire, esta fracción sirve para calentar los cuerpos negros (superior e inferior) de manera simultánea, lo que, mediante procesos de transferencia de calor, incrementa las temperaturas de los flujos másicos de aire que fluyen a lo largo de ambos conductos. Una vez que el aire abandona el calentador solar plano, fluye atravesando longitudinalmente el almacenador térmico, que es capaz de modificar su energía interna logrando una temperatura del aire de secado homogénea. Por otro lado, la capacidad del granito de almacenar energía permite extender el proceso de deshidratado en las horas en las que la irradiación solar empieza a disminuir.

El incremento de la temperatura del aire en el calentador solar plano y en el almacenador de energía ocurre a una humedad absoluta del aire constante, provocando una disminución de la humedad relativa; lo que favorece el proceso de deshidratado.

Una vez que el aire pasa a través de la cámara de deshidratado, y por ende, sobre los granos de cacao húmedos, aumenta su humedad y es extraído a la atmósfera por efectos de la chimenea, de esta manera se renueva el aire a la entrada del calentador solar plano de aire, lo que permite el reinicio del proceso hasta alcanzarse la humedad final de 7 - 8 % (kg agua/ kg materia seca).

Se asumió lo siguiente [10]:

(i) Temperaturas de equilibrio del policarbonato superior  $T_{ps}$  (ec. 1), policarbonato inferior  $T_{pi}$  (ec. 2) y aluminio pulido  $T_{ap}$  (ec. 3):

$$T_{ps}(t) = \left[ \left( \frac{I_1(dia, t) * \alpha_p}{\alpha_{radiaciontermicap} * \sigma} \right) + T_{ambiente}(t) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$T_{pi}(t) = \left[ \left( \frac{I_2(dia, t) * \alpha_p}{\alpha_{radiaciontermicap} * \sigma} \right) + T_{ambiente}(t) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$T_{ap}(t) = \left[ \left( \frac{I_1(dia, t) * \alpha_{ap}}{\alpha_{radiaciontermicaap} * \sigma} \right) + T_{ambiente}(t) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Donde:

$I_1, I_2, \alpha, \sigma$ : Irradiación solar en superficie inclinada superior e inferior ( $W/m^2$ ), Absortividad (adimensional) y Constante de Stefan-Boltzman ( $W/m^2K^4$ ), respectivamente.

(ii) Mientras el cacao no llega a su humedad crítica (punto donde finaliza la velocidad de deshidratado constante) se comporta como una superficie líquida [11]. Para estimar el flujo másico de agua evaporada y la velocidad de deshidratado, se utilizan la ec. 4 y ec. 5 respectivamente.

$$\dot{m}_{agua\ evaporada} = R * Area_{CAMARA} \quad (4)$$

$$R = \begin{cases} f_1(w) = h_D(w_s - w_{e,s}); HI < w < HC \\ f_2(w) = R_3 + \frac{(w - w_3)}{(w_2 - w_3)}(R_B - R_3); HC < w < P \\ f_3(w) = \frac{(w - w_{equilibrio\ final})}{(w_3 - w_{equilibrio\ final})} R_3; P < w < HF \end{cases} \quad (5)$$

Donde:

$R$ : Velocidad de secado ((kg agua/kg materia seca)/minutos)

$h_D$ : Coeficiente de transporte de masa ( $m^2/s$ )

$w$ : contenido de humedad del sólido húmedo,  $w_{e,s}$ : humedad específica del aire a la entrada y salida de la cámara de deshidratado,  $P$ : primer periodo decreciente (kg agua/kg materia seca)

$HI$ : humedad inicial,  $HC$ : humedad crítica,  $HF$ : humedad final (%)

Se realizan los balances energéticos de cada una de las partes que constituyen el deshidratador.

### Balance energético general - calentador solar plano de aire

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_T}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO} + \dot{m}_{aire}(h_s - h_e) \quad (6)$$

Donde:

$A_c, U_T, \dot{Q}_{NETO}, \dot{m}_{aire}, h_s, h_e$ : área del calentador ( $m^2$ ), energía interna total en el calentador solar plano de aire (J), calor neto intercambiado (W), flujo másico de aire (kg/s), entalpías de entrada y salida (kJ/kg)

Para el volumen de control sobre policarbonato superior (ec. 7), aire en el ducto superior (ec. 8), cuerpo negro superior (ec. 9):

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_{ps}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{ps}} \tag{7}$$

$$\dot{Q}_{NETO_{aire1}} = \dot{m}_{aire1} (h_s - h_e) \tag{8}$$

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_{cs}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{cs}} \tag{9}$$

Donde:

$U_{ps}, U_{cs}, Q_{NETO_{ps}}, Q_{NETO_{aire1}}, Q_{NETO_{cs}}, \dot{m}_{aire1}$ : energías internas en el policarbonato y cuerpo negro en ducto superior (J), calor neto intercambiado (W) entre policarbonato superior, aire en ducto superior y cuerpo negro superior, flujo másico de aire en ducto superior (kg/s)

Para el volumen de control sobre policarbonato inferior (ec. 10), el cuerpo negro inferior (ec. 11), el almacenador térmico (ec. 12) y el aire en el ducto inferior (ec. 13):

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_{pi}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{pi}} \tag{10}$$

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_{ci}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{ci}} \tag{11}$$

$$\frac{1}{A_c} \left( \frac{dU_{gra}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{gra}} \tag{12}$$

$$\dot{Q}_{NETO_{aire2}} = \dot{m}_{aire2} (h_s - h_e) \tag{13}$$

Donde:

$U_{pi}, U_{ci}, U_{gra}, \dot{Q}_{NETO_{pi}}, \dot{Q}_{NETO_{aire2}}, \dot{Q}_{NETO_{ci}}, \dot{Q}_{NETO_{gra}}, \dot{m}_{aire2}$ : energías internas en el policarbonato, cuerpo negro en ducto inferior y en granito (J), calor neto intercambiado (W) entre policarbonato inferior, aire en ducto inferior, cuerpo negro inferior y granito, flujo másico de aire en ducto inferior (kg/s)

### Balance energético general - almacenador térmico

$$\frac{1}{A_{alm}} \left( \frac{dU_{T2}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{alm}} + \dot{m}_{aire} (h_{s2} - h_{e2}) \tag{14}$$

Donde:

$A_{alm}, U_{T2}, \dot{Q}_{NETO_{alm}}, h_{s2}, h_{e2}$ : área del almacenador térmico (m<sup>2</sup>), energía interna total en el almacenador térmico (J), calor neto intercambiado en el almacenador térmico (W), entalpías de entrada y salida (kJ/kg) en el almacenador térmico.

Para el volumen de control sobre policarbonato del almacenador térmico (ec. 15):

$$\frac{1}{A_{alm}} \left( \frac{dU_{p2}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{p2}} \tag{15}$$

Donde:

$U_{p2}, \dot{Q}_{NETO_{p2}}$ : energía interna en el policarbonato del almacenador térmico y calor neto intercambiado (W) en policarbonato del almacenador térmico

Para el volumen de control sobre el aire en el almacenador térmico (ec. 16):

$$\dot{Q}_{NETO_{airealm}} = \dot{m}_{airealm} (h_{s2} - h_{e2}) \tag{16}$$

Donde:

$\dot{Q}_{NETO_{airealm}}, \dot{m}_{airealm}$ : calor neto intercambiado (W) con aire en almacenador térmico y flujo másico de aire en almacenador térmico (kg/s)

### Balance energético general - cámara de deshidratado

Para el proceso total de deshidratado, se considera la transferencia de masa y los procesos de transferencia de calor por convección y radiación (ec. 17):

$$R \cdot h_{fg,W} = h_c (\bar{T}_{es} - T_w) + h_r (\bar{T}_{es} - T_{pp}) + I_H \cdot \tau_p \tag{17}$$

Donde:

$h_{fg,W}, \bar{T}_{es}, \bar{T}_{pp}, I_H, \tau_p, h_c, h_r$ : calor latente de vaporización del agua (kJ/kg), temperatura promedio entre la entrada y salida de la cámara de deshidratado (°K), temperatura de las paredes y policarbonato de la cámara de deshidratado (°K), irradiación solar sobre superficie horizontal (W/m<sup>2</sup>), transmisividad policarbonato compacto, coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>K), coeficiente radiativo (W/m<sup>2</sup>K)

El tiempo de duración que se prolonga cada uno de los periodos de secado se relaciona con la humedad del producto (ec. 18). Siendo "i", los intervalos principales de deshidratado:

$$t_i = \frac{1}{A} \left[ \int_{W_{inicial}}^{W_{final}} \frac{dW}{f_i(W)} \right] \tag{18}$$

### Parámetros de entrada al modelo matemático

El modelo se aplicó al deshidratado de cacao en la localidad de Chuao (Lat.: 10°20'32,45"; Long.: 67°31'39,14"), Estado Aragua-Venezuela. Las condiciones atmosféricas fueron medidas durante la zafra del mes de Diciembre. Durante ese periodo de tiempo se construyó la curva de secado del cacao

de manera tradicional al sol en el patio de secado. Se tomaron muestras de granos de cacao, espaciando la toma de muestras en intervalos regulares de tiempo durante todo el proceso de deshidratado, desde la humedad inicial hasta la humedad final. Esta curva se utilizó como criterio de comparación y ajuste al modelo matemático planteado.

El flujo másico de aire es función de distintas variables tales como: velocidad del aire circundante, temperatura del aire ambiental, irradiación solar instantánea. Con la chimenea se pretende mantener el flujo másico en el rango de:  $0,014 < \dot{m}_{\text{aire}} < 0,042$  kg/s. Para definir las dimensiones de la chimenea se utiliza la ec. 19:

$$Area_{chimenea} = \pi * Radio^2 \quad (19)$$

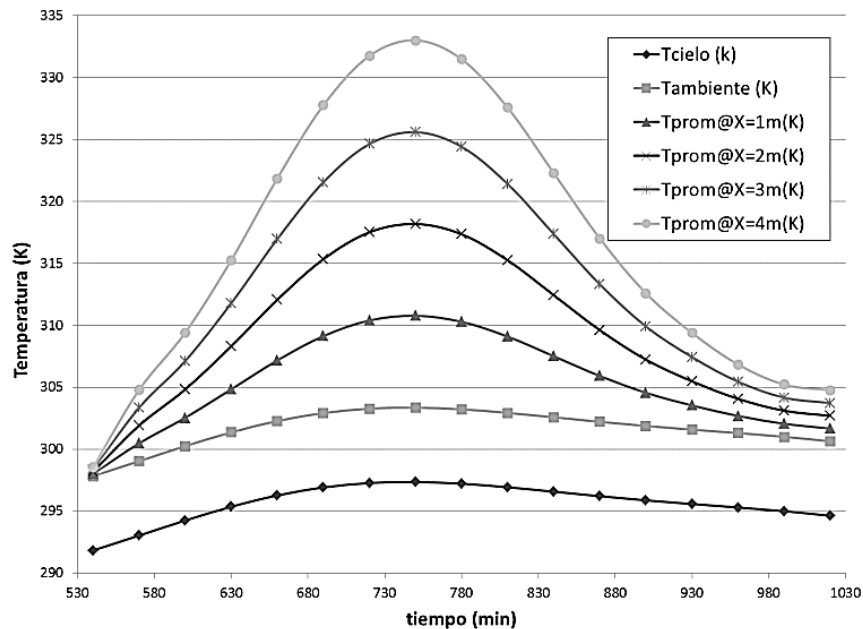


Figura 2. Comportamiento de la temperatura del aire a la salida del calentador solar para diferentes longitudes

Se aprecia el incremento de la temperatura del aire a la salida del calentador solar plano de aire al aumentar la longitud del mismo. Esta tendencia refleja el hecho de que, a mayor longitud del calentador solar, mayor será el área de contacto entre el aire húmedo, desde la entrada hasta la salida del calentador, lo que aumenta el tiempo de contacto entre el aire y la placa absorbadora, trayendo como consecuencia un incremento en la transferencia de calor entre ambas.

Según Fara et al. [8], un deshidratador solar bien diseñado, será capaz de calentar el aire de secado en

## Resultados y Discusiones

Realizados los diferentes balances generales y específicos para cada parte constitutiva del deshidratador solar propuesto para el modelado matemático, se procedió a programar (Mathcad®) las ecuaciones que conforman los sistemas de ecuaciones descritos y se realizaron las corridas específicas.

### Simulación matemática de la longitud del calentador solar plano de aire:

Se realizaron diversas corridas relacionadas con la variación de la longitud del calentador solar plano de aire en el rango:  $2 \text{ m} < L < 4 \text{ m}$  [3] (Figura 2).

un rango de 10 - 25 °C por encima de la temperatura ambiente.

### Simulación matemática para la variación de la humedad relativa del aire:

La humedad relativa del aire que atraviesa el calentador solar plano, se relaciona con el comportamiento de la temperatura del mismo, por lo que a medida que aumenta la longitud del calentador, se incrementa la temperatura del aire y disminuye su humedad relativa. Este comportamiento se aprecia en la figura 3.



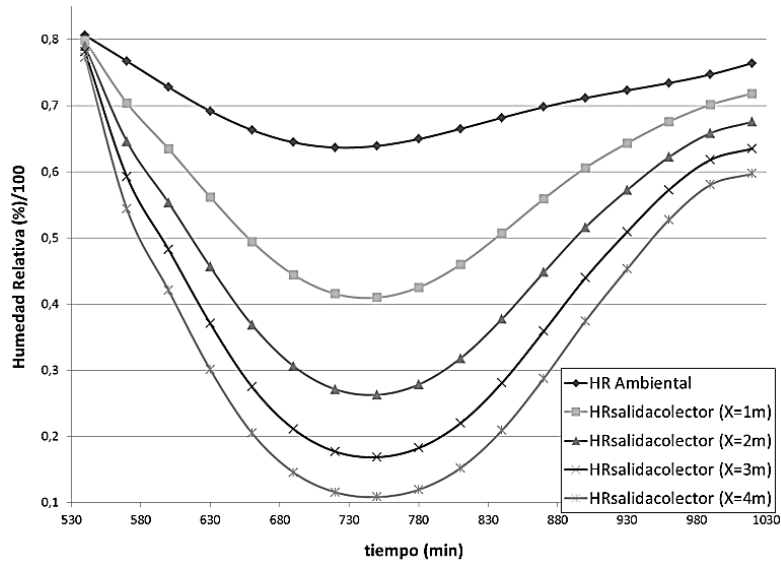


Figura 3. Comportamiento de la humedad relativa (HR) del aire para diversos valores de longitud del prototipo planteado

**Simulación mediante modelo matemático del deshidratado solar directo de cacao:**

Realizadas las simulaciones para las variaciones de temperatura y humedad relativa del aire de secado en función de la longitud que ocurren en el calentador solar plano de aire, se procede a comparar con los valores obtenidos del comportamiento del deshidratado solar directo tradicional obtenido mediante la medición directa en el patio de secado, de la comunidad de Chuao (Figura 4). La comparación inicial resulta en el comportamiento

descrito por la curva como: “Simulación Deshidratado Mejores Valores”. Esta curva muestra una tendencia a deshidratar el cacao mucho más rápido que el secado tradicional en el patio, disminuyendo el tiempo total de aproximadamente 1900 minutos continuos de proceso a 900 minutos, lo que se traduce en una disminución de aproximadamente 4 días continuos de secado en el patio durante 8 horas diarias a 2 días continuos. Además, esta aproximación logra cumplir con los valores finales de humedad normalizados aceptados para la comercialización de un grano de cacao de alta calidad.

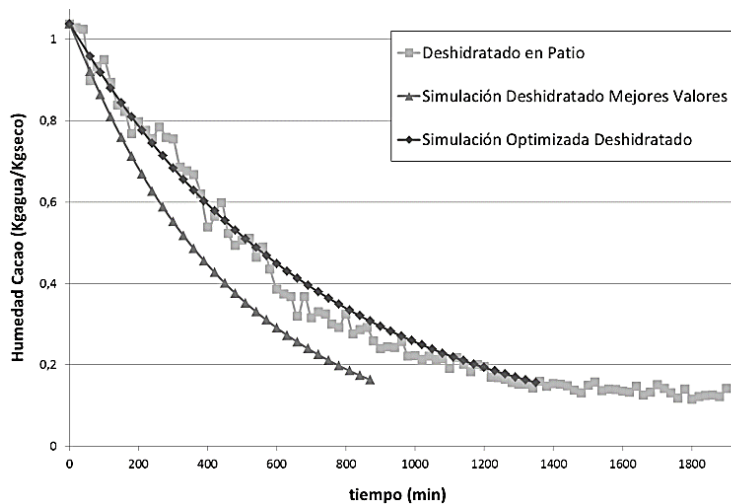


Figura 4. Comparación entre Deshidratado en Patio y Simulaciones (Mejores Valores, Optimización) usando modelo matemático planteado

No obstante, garantizar que se alcanza el valor de acidez final del producto aceptado por la norma, no es posible, lo que es contraproducente para la calidad final del cacao.

### Optimización de la curva de deshidratado simulada mediante modelo matemático propuesto

Se optimizó la humedad de salida del aire en función del tiempo de secado mediante el modelo matemático planteado, relacionando su impacto en el producto final (cacao seco), realizando diversas simulaciones matemáticas, hasta lograr un comportamiento ajustado al proceso de deshidratado tradicional ( $R^2 = 0,993$ ).

De la figura 4, se desprende que ambas curvas "Deshidratado en Patio y Simulación Optimizada Deshidratado", mantienen similitud dentro de los

parámetros que permiten lograr los valores de humedad y acidez final del producto, que garanticen la calidad final del mismo.

Por otro lado, es posible también la disminución del tiempo de deshidratado empleado tradicionalmente en el patio. En el comportamiento descrito por la curva "Simulación Optimizada Deshidratado"; se emplean, según el modelo matemático, 1400 minutos continuos para el proceso de deshidratado (3 días).

Adicionalmente a la disminución del tiempo del deshidratado en un 25 % del tiempo empleado actualmente (manteniendo las condiciones promedio de las variables atmosféricas) el modelo matemático de deshidratado solar propuesto, predice que el uso de un almacenador térmico podría ser capaz de mantener el proceso de deshidratación por 150 minutos adicionales (2,5 horas) (Figura 5).

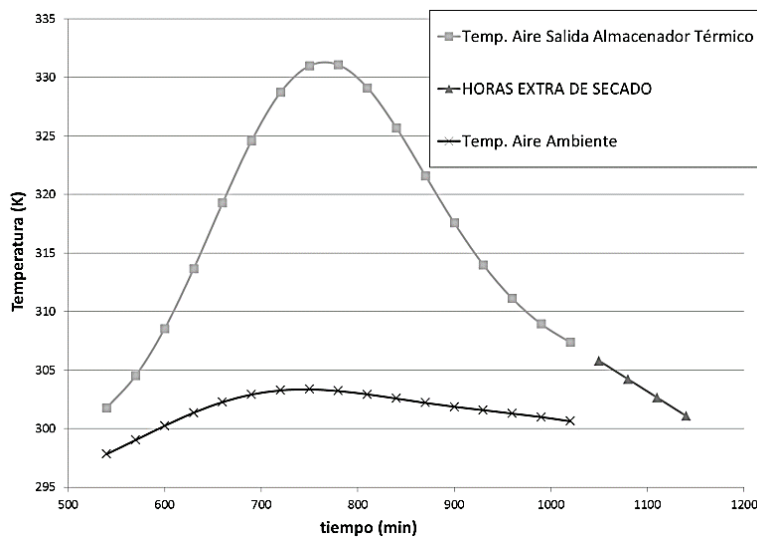


Figura 5. Estimación de Tiempo Extra de Deshidratado debido al uso de almacenador térmico

### Conclusiones

- El modelo matemático para el calentador solar plano de aire propuesto, permite incrementar la temperatura del aire hasta 65 °C, y reducir su humedad relativa hasta un 10%, para las condiciones promedio de la localidad bajo estudio.

- El modelo propuesto permite reproducir un comportamiento del proceso de secado similar al correspondiente a la curva de secado solar tradicional obtenida en el patio tradicional de Chuao.

- El modelo matemático predice la capacidad de mantener por dos horas y media más, el proceso de

deshidratado del cacao una vez la insolación solar alcanza su valor mínimo.

- El proceso de deshidratado solar modelado permite reducir el tiempo de deshidratado del cacao en un 25 %, en relación al secado tradicional solar en patio.

### Referencias

- [1] Manoj M. y Manivannan A.: "Simulation of solar dryer utilizing greenhouse effect for cocoa bean drying". International Journal of Advanced Engineering Technology, Vol. IV, Issue II, April-June (2013) 24 - 27.



- [2] Pastrana A.: "Nopal (*Opuntia lasiacantha*) drying using an indirect solar dryer". *Energy Procedia*, Vol. 57; (2014) 2984 – 2993.
- [3] Dilip J. y Rajeev K. J.: "Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application". *Journal of Food Engineering*, Vol. 65; (2004) 497 – 509.
- [4] Abdulla S., Wen P., Landers R. y Yousif B.: "Fruit drying process: Analysis, modeling and simulation". *Scientific Research and Essays*, Vol. 6(23); (2011) 4915 – 4924.
- [5] Benhamou A., Fazouane F. y Benyoucef B.: "Simulation of solar dryer performances with forced convection experimentally proved". *Physics Procedia*, Vol. 55; (2014) 96 – 105.
- [6] Saber C., Fethi z., Ahmed B.: "Drying of agricultural crops by solar energy". *Desalination* Vol. 68; (2004) 101 – 109.
- [7] Dilip R. P., Sawhney R. L. y Sarsavadia P. N.: "Design, development and performance testings of a new natural convection solar dryer". *Energy*, Vol. 27; (2002) 579 – 590.
- [8] Fara S., Ambarita H., Napitupulu F. y Kawai H.: "Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans". *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 5; (2014) 32 – 40.
- [9] Aboul-Enein S., El-Sebaei A. A., Ramadan M. R. y El-Gohary H. G.: "Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications". *Renewable Energy*, Vol. 21; (2000) 505 – 522.
- [10] Holman J. P.: "Transferencia de Calor", McGraw Hill Book Company, México, (1999).
- [11] Threlkeld J.: "*Ingeniería del Ámbito Térmico*". Universidad de Minnesota, (1973).

Recibido el 25 de Enero de 2016  
En forma revisada el 22 de Mayo de 2017



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## **REVISTA TECNICA**

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

**Vol. 40. N°3, Diciembre 2017** \_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre de 2017, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[produccioncientifica.luz.edu.ve](http://produccioncientifica.luz.edu.ve)