



## Evaluación experimental de un secador solar inflable de bolsa para el secado de cacao

### Experimental evaluation of an inflatable solar bag dryer for cocoa drying

Roberto Enrique Tenorio-Herrera<sup>1†</sup>, María Carolina Urbina-Cornavaca<sup>1†</sup>, Rodolfo Agenor Espinosa-Morales<sup>1\*</sup>, María de Fátima Bolaños-Ortega<sup>2</sup>, Henry Pedroza-Chamorro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), C.P 5595, Managua, Nicaragua,  
\*E-mail: [rodolfo.espinosa@fiq.uni.edu.ni](mailto:rodolfo.espinosa@fiq.uni.edu.ni)

<sup>2</sup> Departamento de Agroalimentos y Postcosecha, Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA),  
C.P 1247, Managua, Nicaragua.

†Autores con igual contribución

(*recibido/received: 18-mayo-2023; aceptado/accepted: 05-septiembre-2023*)

#### RESUMEN

En este trabajo se utilizó un prototipo de secador solar inflable de bolsa para evaluar el secado de cacao recién fermentado. Dicho secador consta de un túnel semicilíndrico con fondo de lona vinílica impermeable color negro y cubierta de plástico translúcido; ambas partes unidas mediante una cremallera. Este secador solar híbrido directo y activo, de baja temperatura, tiene una longitud total de 6.15 m y ancho 2.00 m; área útil de secado 8.82 m<sup>2</sup>; capacidad 177 kg de cacao recién fermentado. Su sistema fotovoltaico suministra energía a un ventilador y a una resistencia eléctrica. Durante la evaluación se redujo en cinco días la humedad de 84.60 kg de cacao recién fermentado desde 50% bh hasta 7.4% bh; manteniendo su temperatura siempre por debajo de 65 °C. A su paso por el equipo a 0.017 m/s, el aire desecante incrementaba su temperatura hasta en 20 °C y reducía su humedad relativa hasta 30 %. La eficiencia energética promedio del secador disminuyó conforme se reducía la humedad del grano: desde 72.63%, el primer día, hasta 8.51%, el quinto día. La evaluación físico-sensorial del cacao obtenido indicó que es aceptable para elaborar chocolate.

**Palabras claves:** desempeño térmico; eficiencia energética; secador solar; bolsa; calidad; cacao.

#### ABSTRACT

In this work, a prototype inflatable solar bag dryer was used to evaluate the drying of freshly fermented cocoa. Said dryer consists of a semi-cylindrical tunnel with a black waterproof vinyl canvas bottom and a translucent plastic cover; both parts joined by a zipper. This low-temperature direct and active hybrid solar dryer has a total length of 6.15 m and a width of 2.00 m; useful drying area 8.82 m<sup>2</sup>; capacity 177 kg of freshly fermented cocoa. Its photovoltaic system supplies energy to a fan and an electrical resistance. During the evaluation, the humidity of 84.60 kg of freshly fermented cocoa was reduced in five days from 50% wb to 7.4% wb; keeping its temperature always below 65 °C. As it passed through the equipment at 0.017 m/s, the drying air increased its temperature by up to 20 °C and reduced its relative humidity by up to 30 %. The average energy efficiency of the dryer decreased as grain moisture decreased:

from 72.63%, on the first day, to 8.51%, on the fifth day. The physical-sensory evaluation of the obtained cocoa indicated that it is acceptable for making chocolate.

**Keywords:** thermal performance; energy efficiency; sundryer; bag; quality; cocoa.

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir del 2017 Nicaragua cuenta con la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Cacao-cultura, la cual considera la selección de clones adecuados de cacao, manejo agroforestal, beneficiado (que incluye fermentación y secado del grano) y procesamiento del cacao. La finalidad de dicha estrategia es ubicar a Nicaragua como país productor de cacao fino y de aroma.

El cacao es un alimento que requiere beneficiado conformado por tres etapas y seis actividades. La primera etapa está constituida en dos actividades las cuales son la cosecha de las mazorcas maduras y la extracción-selección de las semillas. La segunda etapa está conformada por dos actividades tales como la fermentación y el secado del grano. La calidad del cacao se verá afectada de manera directa y en mayor proporción por estas dos actividades, ya que son puntos críticos del beneficiado. La fermentación representa el 41% y el secado el 31% de impacto en la calidad final del producto. Finalmente, la tercera etapa consiste de las actividades de empaclado y transporte del cacao a los centros de comercio (Ayestas et al., 2014).

Posterior a la fermentación, los granos de cacao pueden tener una humedad del 50% a 55% en base húmeda (bh). Para su almacenamiento, transporte y manejo, sin riesgo de deterioro, la humedad del cacao debe reducirse hasta 6.5 – 8% bh, en dependencia del mercado (INTA, 2009; IPADE, 2017). El método más económico y simple de secado, utilizado por los pequeños productores, consiste en tender los granos de cacao al sol (INTA, 2009). Sin embargo, este método es dependiente de las condiciones climáticas y el grano puede contaminarse fácilmente por materias extrañas y plagas. Además, en temporada lluviosa el secado podría no efectuarse adecuadamente o prolongarse por mucho tiempo, propiciando el crecimiento de moho y por tanto afectando negativamente su calidad (Valdivia Arrunátegui, 2013; IPADE, 2017). De forma alternativa, algunos productores realizan el secado en marquesinas o con secadores tipo samoá. Sin embargo, el primer sistema también es dependiente de las condiciones climáticas. Por su parte, con el segundo sistema se tiene un costo de operación mayor por el consumo de combustible y existe el riesgo de contaminar el cacao con los gases de combustión (MEFCCA y Cooperación Suiza en América Central, 2017a y 2018b; INTA, 2009; ProDeSoC, 2006). Aquellos pequeños y medianos productores que no pueden realizar por su cuenta la fermentación y el secado, optan por vender a centros de acopio el cacao en baba. El precio del cacao en baba oscila entre C\$ 10/libra-C\$ 20/libra. En cambio, con un adecuado manejo postcosecha, el precio del cacao fermentado y seco puede alcanzar hasta C\$ 80/lb.

El Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA, propuso a la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, trabajar en el desarrollo de un secador solar destinado al secado de cacao. Se creó un equipo de trabajo multidisciplinario con estudiantes y docentes de tres ingenierías: Electrónica, Agrícola y Química; quienes diseñaron un secador solar inflable de bolsa. Una vez construido el secador, el equipo de Ingeniería Química realizó su evaluación experimental secando cacao recién fermentado. Es preciso señalar que la etapa de diseño y construcción del secador solar no es objeto de estudio en este documento. Solo se abarca la evaluación del desempeño térmico y la eficiencia energética del secador, así como la evaluación de la calidad del cacao seco.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SECADOR

Las características físicas del secador utilizado en el presente trabajo se resumen en la Tabla 1. El secador, respecto a la forma de aprovechar la radiación es híbrido directo. Funciona principalmente como un secador directo mientras se cuenta con radiación solar. Sin embargo, en ocasiones con baja o nula radiación solar, cuenta con una resistencia eléctrica de 200 W. Adicionalmente, es un secador activo ya que cuenta con un ventilador de 25 cm de diámetro y potencia nominal 80 W.

Tabla 1. Características físicas del secador solar.

Características	Descripción
Tipo de secador	Híbrido directo y activo, de baja temperatura
Peso Total (kg)	67.05
Secador	11.60
Maletín	0.90
Panel solar	10.50
Batería	37.75
*Accesorios	6.30
Dimensiones Totales	
Longitud	6.15 m
Ancho	2.00 m
Área de Secado	8.82 mP <sup>2</sup>
Longitud	4.90 m
Ancho	1.80 m
Área de Cubierta	7.25 mP <sup>2</sup>
Longitud	4.90 m
Ancho	1.48 m
Capacidad (Cacao recién fermentado)	177 kg
Densidad de carga	20 kg/mP <sup>2</sup>
Espesor del lecho	3 cm

\*Accesorios: estructura, ventilador, panel de control, sensores y cableado. Tanto el ventilador como el panel de control se encuentran acoplados a la estructura construida de tubos rectangulares de aluminio.

### 2.2. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL SECADOR

El secador se evaluó secando cacao fermentado, a través de la evaluación de su desempeño térmico y su eficiencia energética, así como la determinación de la calidad del grano procesado (Leon et al.; 2002).

#### 2.2.1. Evaluación del Desempeño Térmico del Secador

El desempeño térmico se estableció a través de la determinación de: el tiempo de secado; la velocidad de secado; el comportamiento respecto al tiempo de la temperatura y humedad relativa del aire, así como de la energía solar incidente. Por tanto, durante los experimentos de secado se registraron: la temperatura y humedad relativa del aire fuera y dentro del secador; la temperatura y humedad del grano; así como la cantidad de energía solar incidente ( $G_T$ ).

Se estableció un protocolo de trabajo en el cual primero se debía presecar por método natural durante 2 días en marquesinas con 3 horas de exposición solar por cada día de presecado. Seguidamente, el proceso de secado se debía

realizar en el secador: el primer día exponiendo los granos al sol durante 4 horas; el segundo día 5 horas y a partir del tercer día aprovechando el máximo de sol posible. En el caso de no contar con marquesinas, se procedió a secar los granos de cacao en el secador con 3.5 horas de exposición solar el primer día; 5 horas para el segundo y tercer día; 6 horas para el cuarto y quinto día; y a partir del sexto día, se exponían los granos de cacao la mayor cantidad de tiempo posible. El secador se instaló sobre una superficie plana horizontal y de tal manera que su entrada estuviese orientada en la dirección de la cual provenía predominantemente el viento. Cada día, antes de introducir el cacao al secador, se midió y registró la masa total del grano empleando una balanza de colgar de dial con garfio, marca BAICO, capacidad nominal de 400 lb y graduación de 1 lb. De igual forma se midió y registró la humedad del grano con un analizador de humedad de granos portátil marca Gehaka, modelo G600i, rango de medición de 5% a 40% en base húmeda (bh); resolución 0.01%. Adicionalmente, estos dos parámetros se registraron al final de cada día al retirar el cacao del secador. En los casos que la humedad del grano superaba el valor máximo del analizador de granos Gehaka, se conservaron muestras de aproximadamente 10 gramos en bolsas con cierre de cremallera bajo refrigeración para determinar posteriormente la humedad base seca (bs) siguiendo el método de determinación de contenido de humedad (método al horno) descrito en la norma internacional ISO 2451:2017 (ISO, 2017) y aplicando la ecuación:

$$X = \frac{\text{masa inicial de la muestra} - \text{masa final de la muestra}}{\text{masa final de la muestra}} \tag{1}$$

Los granos de cacao se distribuyeron en el secador cumpliendo con la carga másica de secado por unidad de área efectiva orientada por la contraparte del INTA. El lecho de cacao se dividió en tres zonas de igual longitud, respecto al largo del secador (zona 1, zona 2 y zona 3 según la Figura 1). En este esquema se asume que la longitud y el ancho del lecho de granos no son iguales a la longitud y ancho del área de secado del secador. Cada 30 minutos, en cada zona se mezclaron manualmente (volteo) los granos, asegurando un secado homogéneo e inmediatamente se tomaron muestras de cacao para medir su humedad empleando el analizador de humedad de granos agrícolas Gehaka. Una vez realizada la medición, las muestras se regresaron al lecho a sus respectivas zonas de origen.

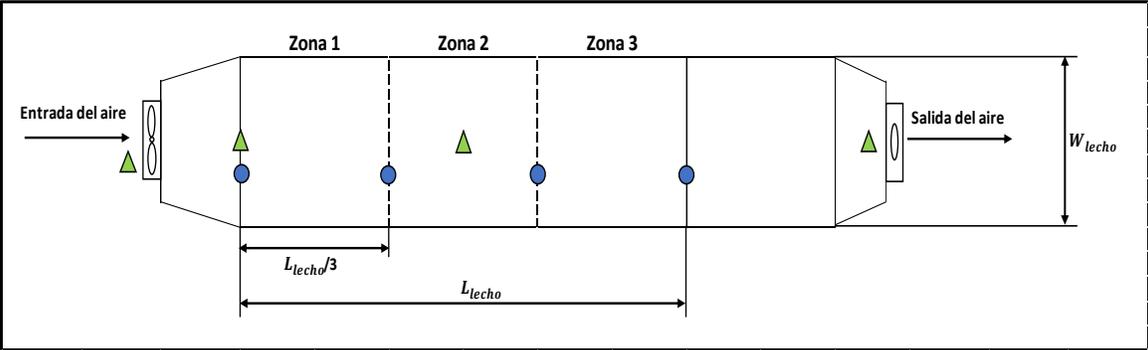


Figura 1. Esquema del secador indicando los puntos para registro de propiedades del aire y del grano.  $L_{lecho}$ : longitud del lecho de granos;  $W_{lecho}$ : ancho del lecho de granos; triángulos, puntos para registro de propiedades del aire; círculos: puntos para registro de propiedades del grano.

Por su parte, en intervalos regulares de tiempo se registró la temperatura del grano en los cuatro puntos del lecho representados por círculos en la Figura 1. Simultáneamente, se registraron la temperatura y humedad relativa del aire en los cuatro puntos de muestreo representados por triángulos en la Figura 1. Todos los parámetros previamente mencionados fueron leídos empleando sensores.

De acuerdo a lo descrito previamente, los cuatro sensores para registro de temperatura del grano se ubicaron a 0, 1, 2 y 3 m del inicio del área útil de secado. Por su parte, los sensores para registro de la temperatura y la humedad relativa

del aire desecante se ubicaron: externamente en la entrada al secador (correspondiente a las propiedades del aire ambiente); e internamente a 0 y 1.5 m del inicio del área útil de secado, así como a la salida del secador.

En el caso de cubrir el área total de secado con granos de cacao, siempre un sensor se ubicaba al inicio del lecho y los demás cada tercio del lecho. En cuanto a los sensores para registro de propiedades del aire, uno de los sensores siempre estaría ubicado externamente y otro a la salida, según la Figura 1; uno de los sensores se ubicaría al inicio del lecho y el otro en el centro.

Adicionalmente, cada 3 minutos se anotó la energía solar total incidente sobre el piso por unidad de área, irradiancia, empleando un medidor de energía solar Dr. Meter®, modelo SM206, resolución 0.01 W/mP<sup>2</sup>P, precisión ±5%. Cada día, al completarse el tiempo de exposición solar, los granos se retiraron del secador y se guardaron en sacos limpios. El experimento de secado se debía finalizar al alcanzar una humedad cercana al 6.5% bh, valor mínimo propuesto por la contraparte del INTA.

### 2.2.2. Evaluación de la Eficiencia Energética del Secador

La eficiencia energética promedio del secador para cada día de exposición solar se determinó de dos maneras. La primera, denotada  $\eta_{dia,con}$ , toma en consideración la energía consumida por el ventilador y se calculó aplicando la ecuación (McCabe Smith, & Harriot, 2007; Vijayan, et. al, 2017; Kudra, 2004):

$$\eta_{dia,con} = \frac{E_{ev,dia}}{E_{T,dia}} \quad (2)$$

La segunda manera, denotada  $\eta_{dia,sin}$ , no considera la energía consumida por el ventilador y por tanto la ecuación 2 se reescribe como:

$$\eta_{dia,sin} = \frac{E_{ev,dia}}{E_{S,dia}} \quad (3)$$

La energía utilizada por día para evaporar la humedad del material,  $E_{ev,dia}$ , se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$E_{ev,dia} = \int_{t_{i,dia}}^{t_{f,dia}} \dot{m}_{w,dia} \lambda_v dt \quad (4)$$

Para un secador discontinuo, la cantidad de agua evaporada por cada día,  $m_{w,dia}$ , se determinó como la diferencia entre masa total del grano de cacao introducida al secador,  $m_{i,dia}$ , y la masa total del grano de cacao retirada del secador,  $m_{f,dia}$ , además se debe considerar el retiro de broza,  $m_{broza,dia}$ :

$$m_{w,dia} = m_{i,dia} - m_{f,dia} - m_{broza,dia} \quad (5)$$

Tal como se detalló anteriormente, en el caso de extraer muestras de cacao para determinar su humedad con el método al horno, la ecuación 6 propuesta para calcular la cantidad de agua evaporada por cada día,  $m_{w,dia}$ , fue modificada para considerar las mermas debidas a el retiro de muestras de cacao para determinar su humedad,  $m_{muestras,dia}$ . Por tanto, la ecuación modificada para calcular  $m_{w,dia}$  es:

$$m_{w,dia} = m_{i,dia} - m_{f,dia} - m_{muestras,dia} - m_{broza,dia} \quad (6)$$

El calor latente de vaporización,  $\lambda_v$ , se calculó con el valor promedio de la temperatura del sólido por cada día,  $\bar{T}_{sol,dia}$ , la cual a su vez fue obtenida a partir de los datos de temperatura del grano registrados en los cuatro puntos del lecho indicados previamente. Por tanto, la ecuación 4 se evaluó de la siguiente manera:

$$E_{ev,dia} = m_{w,dia} \lambda_v (\bar{T}_{sol,dia}) \quad (7)$$

Por su parte, la energía solar suministrada por día al secador,  $E_{S,dia}$ , fue calculada a partir de los datos anotados de la energía total solar incidente sobre el piso por unidad de área,  $G_T$ .

$$E_{S,dia} = A_{lecho} \int_{t_{i,dia}}^{t_{f,dia}} G_T(t) dt \quad (8)$$

La integral de la ecuación 8 se evaluó empleando el programa MATLAB. El área efectiva de secado  $A_{lecho}$ , asumida constante, corresponde al área del lecho del grano.

Finalmente, la energía total suministrada por día al secador,  $E_{T,dia}$ , se obtuvo sumando los aportes de  $E_{S,dia}$  y de  $E_{f,dia}$ . Esto último es válido para un secador directo y activo (Leon et al., 2002), por tanto:

$$E_{T,dia} = E_{S,dia} + E_{f,dia} \quad (9)$$

A su vez, para el caso de potencia del ventilador constante,  $P_f$ , la energía consumida por el ventilador por día,  $E_{f,dia}$ , se calculó mediante la ecuación:

$$E_{f,dia} = P_f (t_{f,dia} - t_{i,dia}) \quad (10)$$

### 2.2.3. Evaluación de la Calidad del Cacao

La calidad del cacao secado en el secador se estableció a través de los aspectos de calidad: sabor y características físicas. Para la evaluación de estos dos aspectos, se sometieron muestras de cacao procesado en el secador con un catador especialista en cacao. Adicionalmente, se siguió el procedimiento indicado en la norma ISO 2451:2017 (ISO, 2017) para la clasificación del tamaño de los granos de cacao procesados en el secador (End & Dand, 2015).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SECADOR

El secador fue instalado en la azotea del edificio 02 (edificio de Ingeniería Química) del Recinto Universitario Simón Bolívar, Universidad Nacional de Ingeniería; con su entrada orientada a 241°SO. En cuanto al tiempo de exposición solar, los granos de cacao se procesaron según el tiempo indicado en la metodología durante cinco días de exposición solar. En todo este período no se activó la resistencia térmica; es decir, el secador operó exclusivamente como secador directo. Se procesaron 84.60 kg (186.46 lb) de cacao recién fermentado y se obtuvieron 44.55 kg (98.19 lb) de cacao seco. Los granos de cacao se distribuyeron en el secador partiendo del inicio del área útil hasta cubrir 3 m a lo largo del secador,  $L_{lecho}$ . Con respecto al ancho,  $W_{lecho}$ , se colocó en el centro cubriendo 1 m; por tanto, el área del lecho,  $A_{lecho}$ , es de 3 m<sup>2</sup>. El espesor del lecho,  $e_{lecho}$ , se mantuvo en 3 cm.

#### *Tiempo y Velocidad de Secado del Cacao*

Para cada tiempo de muestreo, con las humedades de cada zona se calculó el promedio para todo el lecho. Con los datos obtenidos se construyó la Figura 2. Esta figura 2 incluye las horas acumuladas de exposición solar en el eje de las abscisas, y en el eje de las ordenadas a la humedad en base seca del lecho del grano. Se puede observar de la Figura 2 que, desde la primera carga del cacao recién fermentado, humedad inicial 1.00 bs (50% bh), hasta alcanzar la humedad final de 0.08 bs (7.4% bh), se requirió un tiempo total de 100 horas; constituido por 25.5 horas acumuladas de exposición solar y el resto del tiempo correspondiente a los períodos de almacenamiento.

En la Figura 2 se observa que para alcanzar la mitad de la humedad inicial del lecho (0.5 kg H<sub>2</sub>O/kg ss) se requirió alrededor de 8 horas de exposición solar; casi 6 h más para reducir de nuevo a la mitad la humedad (0.25 kg H<sub>2</sub>O/kg ss); y para reducir la humedad hasta su valor final fueron necesarias 11.5 h adicionales.

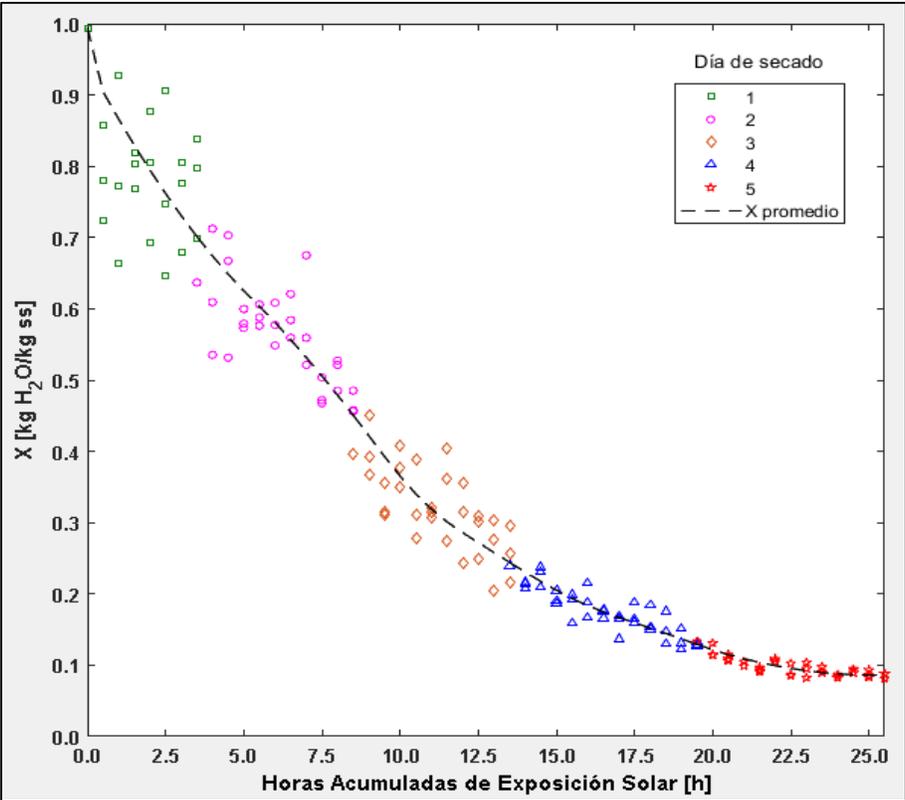


Figura 2. Humedad en base seca del cacao vs horas acumuladas de exposición solar.

En contraste, para el cacao procesado por Sandy et al. (2015), se requirieron 88 horas continuas de secado, las cuales representan más del triple del tiempo demandado en este trabajo. Por el contrario, López & Chávez (2018), quienes secaron cacao desde una humedad 1.3 bs (56.4% bh) hasta 0.065 bs (6.2% bh), reportaron aproximadamente 24 horas acumuladas de exposición solar, 1.5 horas menos en comparación con este trabajo. Este tiempo menor puede ser debido al uso de bandejas con fondo de malla y al empleo de cuatro ventiladores para homogenizar el aire internamente y tres ventiladores para inducir el movimiento del aire a través del secador. Finalmente, con la salvedad de que el secado en este trabajo fue discontinuo, la Figura 2

solamente describe comportamientos decrecientes de la humedad, lo cual coincide con lo reportado por Baryeh (1985).

### *Comportamiento de la Irradiancia y de las Propiedades del Aire*

Con los datos de energía solar incidente, y propiedades del aire se construyó la Figura 3. En esta figura el eje de las ordenadas corresponde a: gráficas superiores, energía solar total incidente por unidad de área (irradiancia); gráficas intermedias, temperatura del aire; y gráficas inferiores, humedad relativa del aire. Por su parte, el eje de las abscisas corresponde a la hora local.

En un secador directo y activo la radiación solar incidente contribuye a aumentar tanto la temperatura del material a secar como la temperatura del equipo. Por su parte, el aire desecante no precalentado aumenta su temperatura y humedad al intercambiar simultáneamente calor y masa por convección forzada con el material a secar. Adicionalmente, dicho aire desecante también intercambia calor por convección forzada con las partes internas del equipo. A su vez, la parte externa del equipo intercambia calor por convección con el aire ambiente, por radiación con el cielo y por conducción con el suelo; todo lo cual, por lo general, es considerado como pérdidas energéticas (Condori, 2016; Salvatierra-Rojas, Ramaj, Romuli, & Müller, 2021).

Por las características físicas del equipo, como la razón largo/ancho 3.4 (6.15 m/1.80 m), se podría asemejar un modelo de flujo del aire desecante tendiente a flujo en pistón. Sin embargo, Salvatierra-Rojas et al. (2021), quienes realizaron experimentos y simulaciones de un secador similar con razón largo/ancho 12.5 (25 m/2 m); reportaron turbulencia que se extendía hasta 4 m de los ventiladores, la cual generaba un patrón de recirculación del aire. Además, observaron reflujo del aire a un metro de la salida del secador. En cambio, en el área central del equipo el comportamiento se aproximaba a flujo pistón.

En el presente trabajo no se realizaron experimentos fluidodinámicos. Sin embargo, al analizar las gráficas de temperatura y humedad absoluta del aire, así como de temperatura del cacao, se puede inferir la existencia de una sección con turbulencia y por ende con recirculación del aire. Esto podría explicar el aumento de temperatura en un tramo tan corto de solo 0.54 m, entre la entrada y el punto de registro a 0.0 m. En esta supuesta sección probablemente predomina la transferencia de calor por convección forzada, debida al mezclado del aire que trae consigo energía (gráficas intermedias de la Figura 3).

En los primeros dos días la radiación solar contribuye a la evaporación de cerca del 55% de la humedad inicial del grano (Figura 2). El agua evaporada desde el sólido hacia el aire, contribuye al aumento de la temperatura del aire a la salida del secador (gráficas intermedias de la Figura 3), mientras que la temperatura del grano no varía apreciablemente.

Por su parte, en los últimos tres días la transferencia de humedad del cacao al aire se verifica a menor velocidad. A diferencia de los días previos, la radiación solar contribuye en mayor medida a aumentar la temperatura del sólido. Por su parte, el aire desecante siempre retira energía del sólido por intercambio de calor por convección forzada, provocando que su temperatura se mantenga entre un rango de 45-50 °C a la salida del secador (gráficas intermedias de la Figura 3).

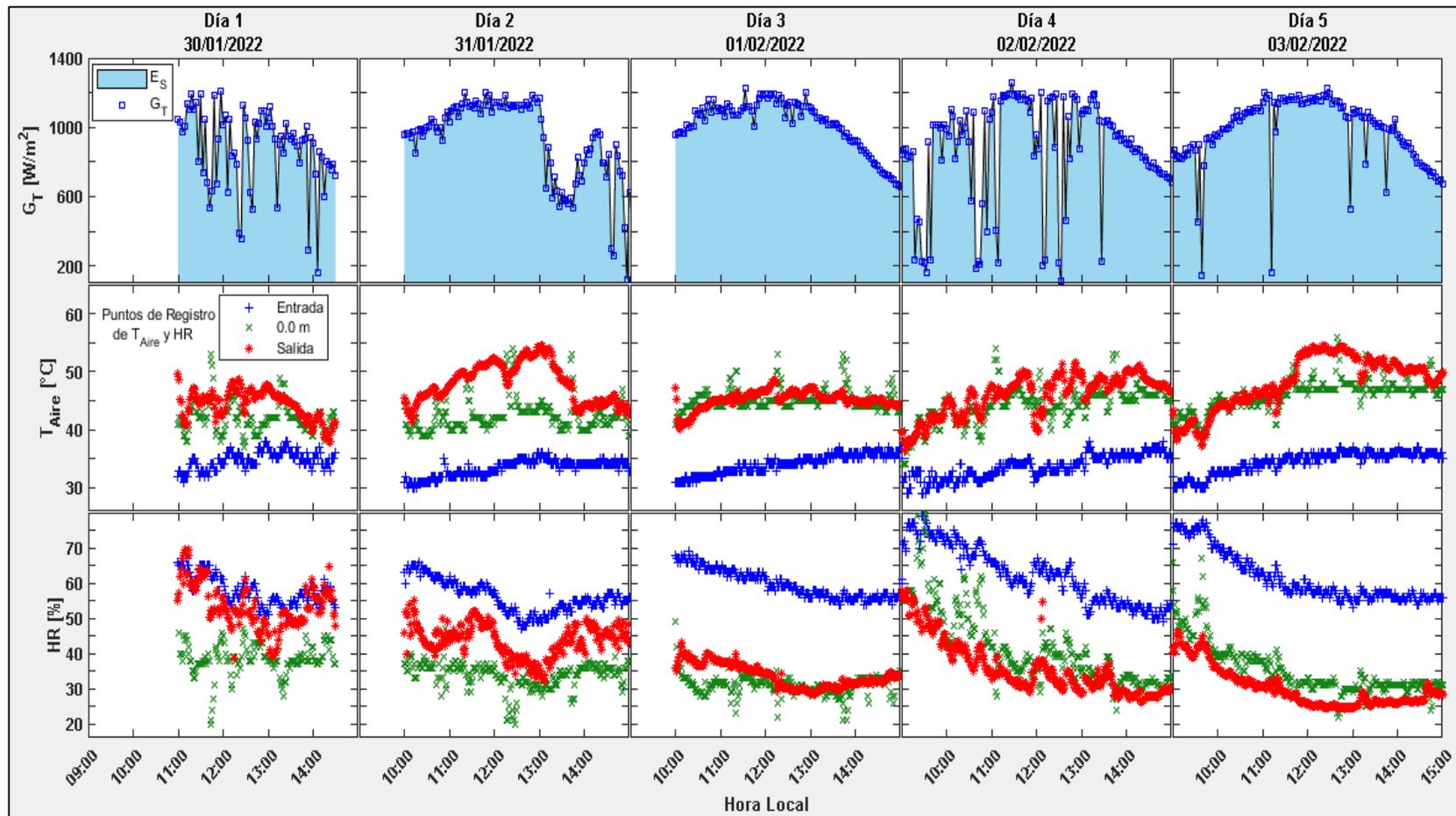


Figura 3. Variación de la irradiancia (gráficas superiores), la temperatura del aire (gráficas centrales), y de la humedad relativa del aire (gráficas inferiores) como función de la hora local, para los cinco días de secado.

### 3.2. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SECADOR

En la Tabla 2 se presentan los valores de la eficiencia energética considerando la energía consumida por el ventilador,  $\eta_{dia,con}$ , así como los de la eficiencia energética sin considerar dicho consumo,  $\eta_{dia,sin}$ . La energía consumida por el ventilador representa aproximadamente el 2% de la energía suministrada por la radiación solar. Por tanto, la energía total suministrada al secador no varió apreciablemente; en consecuencia, ambas eficiencias energéticas son similares.

Como puede observarse de la tabla 2, la eficiencia energética promedio disminuyó conforme se reducía la humedad del grano al avanzar los días. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Chavan, Yakupitiyage, & Kumar (2011), quienes emplearon un secador solar de tunel directo y activo para secar pescado durante 3 días en los cuales las eficiencias fueron de 50.5, 17.6 y 3.2 respectivamente.

Tabla 2. Eficiencia energética promedio diaria del secador con y sin considerar el ventilador.

Día	Horas de exposición solar [h]	$\bar{X}_{inicial}$ [kg H <sub>2</sub> O/kg ss]	$\bar{X}_{final}$ [kg H <sub>2</sub> O/kg ss]	$\eta_{dia,con}$ [%]	$\eta_{dia,sin}$ [%]
1	3.5	1.00	0.78	71.02	72.63
2	5.0	0.64	0.47	26.21	26.77
3	5.0	0.40	0.26	24.10	24.58
4	6.0	0.24	0.13	17.86	18.27
5	6.0	0.13	0.08	8.34	8.51

Adicionalmente, Boughali et al. (2009), quienes trabajaron con un secador solar híbrido indirecto y activo para secar rodajas de tomate, afirman que la eficiencia energética es mayor en las primeras horas y decrece continuamente hasta finalizar el secado. Las altas eficiencias son probablemente debidas a la presencia de humedad en o cerca de la superficie del producto (humedad libre), la cual puede ser removida fácilmente. En cambio, las eficiencias bajas se obtienen cuando el contenido de humedad del producto es bajo, ya que la humedad ligada requiere más energía para su remoción (Boughali, et al., 2009; Banout, et al., 2011).

### 3.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CACAO

Tal como se describió en la metodología, la calidad del cacao se determinó mediante un catador especialista en cacao a quien se le proporcionó 1 kg de para realizar una evaluación físico-sensorial, cuyo reporte contempla parámetros sensoriales y físicos. El cacao proporcionado al catador, corresponde al cacao procesado en el secador durante la evaluación del desempeño térmico del secador llevado a cabo en la UNI.

De acuerdo al reporte del perfil sensorial, la intensidad de los tres sabores no deseados: humo, tierra y astringencia; es mínima. Por su parte, el sabor acidez se encuentra en un valor intermedio. Esto podría ser debido a que no se realizó una etapa de presecado según lo sugerido por la literatura. Sin embargo, según Wood & Lass (1985), si este cacao es destinado a la elaboración de chocolate, durante su procesamiento dicha acidez tiende a desaparecer. Finalmente, la intensidad del sabor deseado a chocolate obtuvo una puntuación alta (4 de 5). En cuanto a la humedad del cacao proporcionado al catador, esta presentó un valor de 7.8% bh; 0.4% por encima al obtenido durante la evaluación del desempeño térmico del secador en la UNI. Esta humedad se encuentra por debajo del máximo de 8% (bh) recomendado por la literatura (End & Dand, 2015; Arvelo et al., 2017; IPADE, 2010; Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

Adicionalmente, se construyó la Tabla 3 en analogía con la tabla 1 de la ISO 2451:2017 (ISO, 2017), en la cual se clasifican los granos de cacao en base al porcentaje máximo de granos con cinco defectos (filas 1 y

2). En la última fila de la Tabla 3 se muestran los resultados del reporte físico-sensorial de los granos de cacao procesado en este trabajo.

Tabla 3. Clasificación de los granos de cacao en base al porcentaje máximo de granos con cinco defectos.

Grado	Mohoso	Pizarroso	Daño por insectos, aplastados y/o germinados
1	3	3	3
2	4	8	6
Reporte de evaluación físico-sensorial	2	2	0+2+0

Como puede observarse de la tabla 3, el cacao obtenido en este trabajo se clasifica como cacao de Grado 1. Desde el punto de vista de seguridad alimentaria (End & Dand, 2015), el bajo porcentaje de granos mohosos, asegura que el cacao es aceptable para consumo humano. Adicionalmente, el bajo porcentaje de granos pizarrosos, indica que el cacao obtenido tuvo un adecuado proceso fermentativo (End & Dand, 2015).

Finalmente, se construyó la Tabla 4 tomando de referencia el cuadro 3 del manual técnico postcosecha de cacao fino y de aroma (PROCOMER, s.f), en el cual se listan los requerimientos de calidad del grano de cacao seco. En esta tabla se incluyeron siete de los nueve parámetros considerados por PROCOMER (s.f). Los otros dos parámetros no fueron incluidos debido a que no se encuentran en el reporte de evaluación físico-sensorial. Con la salvedad de que el cacao secado en el secador es una mezcla de distintos clones, al cumplir con cuatro de los siete parámetros, este se clasificaría como cacao tipo B.

Tabla 4. Especificaciones del grano de cacao seco según los requerimientos de calidad.

Parámetro de clasificación	Límites máximos y mínimos permitidos	Reporte de evaluación físico-sensorial
Peso promedio del grano [g/grano]	$\geq 1.05$	1.37
Humedad mínima [% bh]	6.5-7	<b>7.8</b>
Granos bien fermentados [%]	$\geq 75$	80
Granos con moho interno [%]	$\leq 3$	2
Grano violeta o morado [%]	$\leq 8$	4
Grano pizarroso sin fermentar [%]	$\leq 1$	<b>2</b>
Grano perforado o pegado [%]	$\leq 1$	<b>3</b>

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo fue desarrollado bajo el convenio de colaboración entre la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA. Un equipo de trabajo multidisciplinario con estudiantes y docentes de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Agrícola e Ingeniería Química diseñó un secador solar inflable de bolsa destinado al secado de cacao recién fermentado. Este secador se construyó con materiales disponibles en el mercado local y se corresponde a un secador solar híbrido directo y activo, de baja temperatura: Dimensiones totales 6.15 m de largo y 2.00 m de ancho; área útil de secado de 8.82 m<sup>2</sup> en la cual caben 177 kg de cacao recién fermentado.

Durante la evaluación del secador, realizada en el Recinto Universitario Simón Bolívar, UNI-RUSB; se logró reducir la humedad de 84.6 kg de cacao recién fermentado desde 50% bh hasta 7.4% bh en cinco días, con 25.5 h acumuladas de exposición solar. El 53% de la reducción total de la humedad del grano se produjo en los primeros dos días de secado. La eficiencia energética promedio del secador disminuyó

conforme se reducía la humedad del grano al avanzar los días: desde 72.63% el primer día hasta 8.51% el quinto día. El consumo energético del ventilador no influyó apreciablemente en el valor de esta eficiencia.

Por su parte, los resultados de la evaluación físico-sensorial indican que el cacao obtenido en esta investigación tiene una calidad aceptable para elaborar chocolate; es considerado de Grado 1 de acuerdo a la clasificación interna de granos fermentados en el país productor de la ISO 2451:2017; y de calidad tipo B según los requerimientos de calidad final de cacao fino y de aroma de PROCOMER.

Finalmente, en este trabajo se comprobó que el cacao recién fermentado puede ser secado satisfactoriamente en un secador solar inflable de bolsa. El secador construido es una herramienta de gran utilidad para establecer los protocolos de secado de las distintas variedades de cacao.

## REFERENCIAS

Ayestas, E., Vega-Jarquín, C., Torres, P., Lanzas, J., Orozco, L., & Astorga, C. (2014). Puntos críticos del manejo poscosecha de cacao en Waslala, Nicaragua. *La Calera*, 8.

Aktar, S., Alam, M., Alam, M., Saha, C., & Roy, J. (2022). Solar bubble dryer: alternative to sun drying for reducing drying losses in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agriculture*, 47(1), 1-15. doi:10.3329/bjagri.v47i1.60589

Alam, A., Saha, C. K., Alam, M., Manir, M. R., Hasan, M., & Rashid, M. (2020). Experimental investigation of solar bubble dryer for rough rice drying in Bangladesh. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, 23(2), 1920-1930. doi:10.18801/jbar.230220.236

Arvelo, M. Á., González, D., Maroto, S., Delgado, T., & Montoya, P. (2017). Manual técnico del cultivo de cacao: prácticas latinoamericanas / Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 165. San José, Costa Rica: IICA.

Baryeh, E. (1985). Cocoa drying and storage using charcoal and solar heated rocks. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 16(1), 23-28.

Boughali, S., Benmoussa, H., Bouhekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, 83, 2223-2232. doi:10.1016/j.solener.2009.09.006

Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar Energy*, 85, 506-515.

Condori, M. A. (2016). Secadores solares. In M. A. Laborde, R. J. Williams, M. A. Laborde, & R. J. Williams (Eds.), *Energía Solar* (First ed., pp. 77-87). Salta, Argentina.

Chavan, B. R., Yakupitiyage, A., & Kumar, S. (2011). Drying Performance, Quality Characteristics, and Financial Evaluation of Indian Mackerel (*Rastrilliger Kangurta*) Dried by a Solar Tunnel Dryer. *Science & Technology Asia*, 16(2), 11-25.

End, M., & Dand, R. (2015). CAOBISCO/ECA/FCC Cocoa Beans:Chocolate and cocoa industry quality requirements.

INTA. (2009). Guía tecnológica del cultivo de cacao. 4, 42. Managua, Nicaragua.

IPADE. (2010). Cacao de calidad-Beneficiado en centros de acopio. 24. Managua, Nicaragua.

IPADE. (2017). Cartilla técnica cosecha y poscosecha del cacao. 40. Managua, Nicaragua.

ISO. (2017). ISO 2451. Cocoa Beans, 27. USA.

- Kudra, T. (2014). Energy Aspects in Drying. *Drying Technology*, 22(5), 917-932. doi:10.1081/DRT-120038572
- Lutz, K., & Muhlbauer, W. (1986). Solar tunnel dryer with integrated collector. *Drying Technology: An International Journal*(4), 583-603. doi:10.1080/07373938608916351
- Lutz, K., Muhlbauer, W., Muller, J., & Reisinger, G. (1987). Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zone. *Solar & Wind Technology*, 4(4), 417-424.
- Leon, A. M., Kumar, S., & Bhattacharya, S. C. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 367-393.
- López, I., & Chávez, E. (2018). Efficiency of tunnel type solar dryer with cocoa (*Theobroma Cacao L.*) in Tabasco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9, 4395-4405.
- MEFCCA & Cooperación Suiza en América Central. (2017). Mejoramiento de las capacidades PROCACAO. Nicaragua. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=PvTa\\_Rj58Os](https://www.youtube.com/watch?v=PvTa_Rj58Os)
- MEFCCA & Cooperación Suiza en América Central. (2018a). PROCACAO-Testimonio de productor de cacao (Emeterio Ruiz). Nicaragua. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=MX73jObsWN4>
- MEFCCA & Cooperación Suiza en América Central. (2018b). PROCACAO-Testimonio de productor de cacao (Cecilia Picado). Nicaragua. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=CKj3t0RkXXs>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Seventh ed.). México, D.F: The McGraw-Hill.
- PROCOMER. (s.f). <https://www.procomer.com>. Retrieved Mayo 13, 2022, from <https://www.procomer.com/wp-content/uploads/Manual-poscosecha-de-cacao-fino-y-de-aroma.pdf>
- Reyes, H., & Capriles de Reyes, L. (2000). *El cacao en venezuela-Moderna tecnología para su cultivo*. Caracas, Venezuela: Chocolates El Rey, C.A.
- Sandy, X., Reza, C., Espinoza, J., & Arellano, G. (2015). Control de fermentado y evaluación de un secador con ambiente controlado para cacao nacional. 40. Bolivia: Wildlife Conservation Society (WCS).
- Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T., & Muller, J. (2017). Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. *Int J Agric & Biol Eng*, 10(3), 269-282.
- Salvatierra-Rojas, A., Ramaj, I., Romuli, S., & Müller, J. (2021). CFD-Simulink Modeling of the Inflatable Solar Dryer for Drying Paddy Rice. *Applied Sciences*(11), 22. doi:10.3390/app11073118
- Shelton, B. (1967). Artificial drying of cocoa beans. *Trop. Agric.*, 125.
- Sokhansanj, S., & Jayas, D. S. (2007). Drying of foodstuffs. In A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying* (Third ed., pp. 521-546). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1930). *Drying: principles, applications and desing*. New York: Gordon and Breach Science Publisher.
- Valdivia Arrunátegui, R. (2013). *Fundamentos del secado del cacao*. 48.
- Vijayan, S., Arjunan, T. V., & Kumar, A. (2017). Fundamental Concepts of Drying. In O. Prakash, & A. Kumar, *Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment* (pp. 3-38). Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-10-3833-4\_1
- Wood, G. R., & Lass, R. A. (1985). *Cocoa* (Fourth ed.). Oxford: Blackwell Science Ltd.

## NOMENCLATURA

$A_{lecho}$	Área de lecho de cacao	$m^2$
bh	Base húmeda	$kg\ H_2O/(kg\ H_2O+kg\ ss)$
bs	Base seca	$kg\ H_2O/kg\ ss$
$e_{lecho}$	Espesor del lecho de cacao en el secador	cm
$E_{ev}$	Energía utilizada para evaporar la humedad	MJ
$E_T$	Energía total suministrada al secador	MJ
$E_f$	Energía consumida por el ventilador	MJ
$E_S$	Energía suministrada por la radiación solar	MJ
$G_T$	Irradiancia solar	$W/m^2$
HR	Humedad relativa del aire	%
$L_{lecho}$	Longitud del lecho de cacao	m
$m_w$	Masa de agua evaporada	kg
$m_f$	Masa de cacao al fin del período de exposición solar	kg
$m_{broza}$	Masa de la broza separada del lecho	kg
$m_{muestra}$	Masa de las muestras de cacao	kg
$m_{alm}$	Masa de agua evaporada durante el almacenamiento	kg
$m_i$	Masa de cacao al iniciar el período de exposición solar	kg
$P_f$	Potencia del ventilador	W
ss	Masa de sólido seco	kg
$t_f$	Tiempo al finalizar el período de exposición solar	s
$t_i$	Tiempo al iniciar el período de exposición solar	s
$T_{Aire}$	Temperatura del aire	$^{\circ}C$
$T_{Cacao}$	Temperatura del cacao	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{sol}$	Temperatura promedio del grano	$^{\circ}C$
$W_{lecho}$	Ancho del lecho de cacao	m
$X$	Humedad en base seca del cacao	$kg\ H_2O/kg\ ss$
$\bar{X}$	Humedad promedio en base seca del cacao	$kg\ H_2O/kg\ ss$

### Letras griegas

$\eta_{dia,con}$	Eficiencia energética considerando ventilador	%
$\eta_{dia,sin}$	Eficiencia energética sin considerar ventilador	%
$\lambda_v$	Calor latente de vaporización del agua	$kJ/kg$