

# Evaluation of a cocoa solar dryer prototype in Cilico Creek, Ngäbe Bugle

## Evaluación de un prototipo de secador solar de cacao en Cilico Creek, Ngäbe Buglé

Yoel Martin

*Centro de Investigación e Innovación  
Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
yoel.martin@utp.ac.pa*

Félix Henríquez

*Centro de Investigación e Innovación  
Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
felix.henriquez@utp.ac.pa*

Orlando Melgar

*Centro de Investigación e Innovación  
Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
orlando.melgar@utp.ac.pa*

Luis Mogollón

*Centro de Investigación e Innovación  
Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
luis.mogollon@utp.ac.pa*

**Abstract**— The aim of this work was to evaluate the performance of a mixed type cocoa solar dryer prototype of induced circulation, in the Cilico Creek community, in the Ngäbe Bugle region. The evaluation was carried out by studying the design and operation variables of the prototype, consisting of two parts. First, the performances of three solar dryers were compared during a five-day drying period, considering the temperatures inside the drying chambers and moisture content of the cocoa beans of each dryer. The solar dryers were identified as: Solar Dryer A and Solar Dryer B (mixed type dryers); and Greenhouse Dryer (existing in the community), being Solar Dryer B the object of evaluation. Second, the design variables of Solar Dryer B were calculated, such as: total energy, temperature increase, and the volume of air needed to evaporate the moisture in the cocoa beans. Also, the operation variables such as: total energy supplied to the system, measured temperature increase, efficiency of the drying system, and specific energy consumption were calculated. The results showed a final moisture content in the cocoa beans from Solar Dryer B of 10.31%, an average temperature increase of 2.2°C over ambient temperature, and a total heat supplied of 74.5 MJ during the drying period. An efficiency of 22.82% and a specific energy consumption of 2.75 kWh/kg were shown.

**Keywords**— solar dryer, cocoa, moisture, temperature, efficiency, specific energy consumption.

**Resumen**— El objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de un prototipo de secador solar de cacao tipo mixto con circulación inducida, en la comunidad Cilico Creek, comarca Ngäbe Buglé. La evaluación se realizó mediante el estudio de las variables de diseño y funcionamiento del prototipo, consistiendo en dos partes. Primero, se compararon los funcionamientos de tres secadores solares durante un periodo de secado de cinco días, tomando en cuenta los valores de temperaturas en las cámaras de secado y el contenido de humedad en los granos de cacao de cada secador. Los secadores solares se identificaron como: Secador Solar A y Secador Solar B (secadores tipo mixto); y Secador Invernadero (existente en la comunidad), siendo el Secador Solar B el objeto de evaluación. Segundo, se calcularon las variables de diseño del Secador Solar B, tales como: la energía total, el aumento de temperatura y el

volumen de aire necesario para evaporar la humedad en los granos de cacao. También, se calcularon las variables de funcionamiento tales como: la energía total suministrada al sistema, el aumento de temperatura medido, la eficiencia del sistema de secado y el consumo específico de energía. Los resultados mostraron un contenido final de humedad en los granos de cacao del Secador Solar B de 10.31%, un aumento de temperatura promedio de 2.2°C sobre la temperatura ambiental y un calor total suministrado de 74.5 MJ durante el periodo de secado. Se mostró una eficiencia de 22.82% y un consumo específico de energía de 2.75 kWh/kg.

**Palabras claves**— secador solar, cacao, humedad, temperatura, eficiencia, consumo específico de energía.

### I. INTRODUCCIÓN

El cacao es un fruto proveniente del árbol llamado *Theobroma cacao* L. Es principalmente reconocido por ser la materia prima para la producción del chocolate a nivel mundial. Este fruto ofrece además grandes beneficios en todas sus aplicaciones, desde la parte medicinal, hasta los productos cosméticos [1].

Los árboles de cacao se encuentran en regiones cercanas al ecuador terrestre. Estas regiones ofrecen las condiciones adecuadas para su crecimiento. El *Theobroma cacao* L. requiere de alta temperatura, alta humedad y constantes lluvias para crecer y florecer [2]. Esto indica que los bosques tropicales húmedos son el tipo de ecosistema en el cual se pueden encontrar los árboles de cacao en su mayoría.

El secado del cacao corresponde a la segunda etapa del proceso de la post cosecha, posterior a la fermentación de los granos. El objetivo del secado es llevar la humedad de los granos a niveles entre 6 a 8%. Este proceso puede tardar entre 7 a 10 días, utilizando métodos tradicionales como secado directo al sol y secado dentro de estructuras tipo invernadero. Sin embargo, el tiempo de secado y la calidad de los granos de cacao al finalizar esta etapa dependen estrictamente de las condiciones climáticas ambientales y la exposición a factores externos. Los contenidos finales de humedad en los granos de

cacao deben estar en el rango sugerido ya que, niveles superiores al 8% de humedad establecen un riesgo de crecimiento de moho, mientras que los niveles inferiores al 6% causan el desarrollo de estructuras quebradizas en los granos y pérdida de su aroma. Adicionalmente, se recomienda secar el cacao a temperaturas menores a 60 °C, ya que altas temperaturas pueden afectar las propiedades de los granos [3].

La investigación se llevó a cabo en la comunidad de Cilico Creek. Esta comunidad se ubica en el corregimiento de Tuwai, en la comarca Ngäbe Buglé, Panamá. Se estima que la comunidad cuenta con aproximadamente 500 habitantes. Cilico Creek se caracteriza por ser productora de cacao orgánico. Actualmente, cuenta con la Cooperativa Solary R.L., en donde se unen productores con amplios conocimientos tradicionales a cerca del cultivo y cosecha para la elaboración de productos de cacao [4].

La comunidad de Cilico Creek presenta grandes cantidades de precipitación durante todo el año, con un promedio anual de 2483 mm, contra unos 1992 mm en la Ciudad de Panamá [5]. Esto representa un desafío para los métodos tradicionales de secado utilizados. Estos métodos incluyen el secado directo al sol y en secadores invernadero. La falta de estandarización y organización de los procesos de post cosecha, las enfermedades y otros agentes que afectan el producto durante esta etapa representan otros desafíos que enfrenta la comunidad. Los productores de la comunidad carecen de un control sobre los volúmenes y tiempos de secado. El método utilizado por los productores para identificar que los granos de cacao han alcanzado el nivel final de humedad consiste en escuchar los sonidos que hacen los granos al frotarlos unos con otros. Este método no garantiza un control sobre los contenidos finales adecuados de humedad. La ausencia del control y monitoreo representa una problemática en los niveles de producción a nivel de la comunidad, ya que no se aprovecha parte del potencial que se ofrece en la calidad del cacao. Esta problemática puede ser abordada mediante la implementación de energías renovables utilizando secadores solares.

Los secadores solares son sistemas que aprovechan la energía proveniente del sol para la eliminación de humedad en diferentes tipos de productos. Los alimentos y productos agrícolas son los más comunes en estos secadores. Los sistemas se componen por un colector solar, en donde se capta la radiación incidente y se transfiere al fluido de trabajo con energía térmica, y una cámara de secado, donde se ingresa el producto a deshidratar. Un tipo muy común es el secador solar mixto. Este posee los componentes principales previamente mencionados, en donde la energía solar es absorbida tanto en el colector como en la cámara de secado. Este secador solar puede operar bajo ventilación forzada o ventilación natural. La ventilación forzada consiste en mover el aire a la cámara por medio de un ventilador, mientras que la ventilación natural no utiliza dispositivos de trabajo. La ventilación también puede ser inducida, donde un ventilador extrae el aire de la cámara de secado hacia el ambiente. Los sistemas de secador solar pueden ser también clasificados en otros tipos, los cuales se adecuan a las necesidades específicas de los diferentes productos [6].

Los sistemas de secadores solares ofrecen beneficios para los procesos de secado de productos como el cacao. Un secador solar de colector y cámara ofrece la protección de los granos contra fuentes de contaminación y sus efectos, tales como: partículas, insectos, roedores, pájaros, bacterias,

hongos y contaminantes químicos. Adicionalmente, los sistemas de secadores solares resultan económicos en términos energéticos, de insumos y mano de obra. Si se emplea el sistema adecuado, se pueden reducir los tiempos de secado, mejorando la producción y aumentando la eficiencia de esta etapa de la post cosecha del cacao.

Existe una diversidad de sistemas de secadores solares para los procesos de post cosecha y preparación de productos agrícolas. Un estudio realizado por [7] desarrolló un secador solar con material de almacenamiento de calor sensible, para conservar la temperatura en la cámara de secado. El objetivo fue proponer una alternativa en la metodología de secado de calabaza amarga para superar los problemas asociados con el secado directo al sol. Estos problemas incluían la degradación del producto por el viento, insectos, lluvia e interferencia animal. El contenido de humedad del producto pasó de 92% a 9% en 7 horas. La eficiencia del sistema de secado fue de 19% y el consumo específico de energía de 4.44 kWh/kg.

Otro estudio, realizado por [8], diseñó e implementó un secador de cacao a pequeña escala para disminuir los tiempos de secado con respecto a métodos tradicionales. El sistema se diseñó para secar 10 kg de granos de cacao fermentados. El calor total necesario para remover el contenido de humedad fue de 14539 kJ, correspondiente a valores promedio de radiación y temperatura ambiental de 4.5 kWh y 25 °C, respectivamente.

Un tercer estudio, elaborado por [9], realizó un análisis termodinámico de un secador solar de cacao de convección forzada con un material de almacenamiento de calor sensible. El objetivo fue abordar la problemática de los altos costos energéticos que presenta el secado industrial, al igual que la falta de control y la susceptibilidad a daños por insectos, hongos y bacterias que presenta el secado directo al sol. El análisis contempló un flujo de estado estable a través del sistema, basado en la primera y segunda ley de la termodinámica. La energía utilizada por el sistema fue de 0.739 y 0.724 kJ/kg. Por otro lado, las eficiencias del sistema de secado variaron entre 28.0 y 58.2%.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en estudios anteriores, el presente estudio contempla pruebas experimentales de secado de granos de cacao fermentados utilizando dos prototipos de secador solar mixto de circulación inducida, y un secador tipo invernadero existente en la comunidad de Cilico Creek. Los prototipos de secadores solares mixtos se identificaron como Secador Solar A y Secador Solar B, siendo este último el objeto de evaluación. El objetivo del estudio es evaluar el funcionamiento del Secador Solar B, lo cual permite optimizar el proceso de post cosecha del cacao mediante la implementación de tecnología de energías renovables, aumentando la calidad del producto y el rendimiento de la cosecha. Esto beneficiará a la Cooperativa Solary R.L. con soluciones energéticas, en donde se impulsará el emprendimiento y el comercio entre los productores.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Descripción del Experimento

La experimentación se llevó a cabo en la Cooperativa Solary R.L. de la comunidad de Cilico Creek, Comarca Ngäbe Buglé. Se comparó el proceso de secado entre dos secadores solares tipo mixto y un secador solar del tipo invernadero durante un periodo de 5 días. Para realizar este proceso, primero se fermentaron 81.65 kg de cacao en baba, obtenido

de 300 mazorcas de diferentes variedades. La masa total de cacao al finalizar la fermentación fue de 55.10 kg, en donde se trasladaron 18 kg de cacao a cada uno de los prototipos de secador solar mixto y 19.10 kg al secador invernadero para iniciar el secado. Cada secador contaba con tres niveles de bandejas, con dos bandejas por nivel. El arreglo de bandejas del Secador Solares A se puede observar en la “Fig. 1”. Sobre cada bandeja se colocaron 3.00 kg de granos de cacao fermentados. Los secadores solares mixtos fueron ubicados en la parte posterior de la Cooperativa Solary R.L., con los colectores orientados hacia el sur.



Fig. 1. Interior de la cámara del Secador Solar A, con los granos de cacao distribuidos en los tres niveles de bandejas. Fuente: Propia.

Previo al traslado del cacao desde los fermentadores hacia los secadores, estos fueron armados colocando las 6 bandejas en su respectiva posición. Luego, se insertaron los colectores solares a la cámara de secado. Una vez armados los secadores, se realizó la instalación de los sistemas de ventilación. Los ventiladores instalados en ambos secadores se encargan de extraer el aire de la cámara de secado hacia el exterior. El sistema de ventilación del Secador Solar A estaba compuesto por una celda solar conectada directamente a un ventilador, de manera que el control de la velocidad se diera por la radiación sobre la celda. Esto establece una relación en la que, a mayor radiación, mayor velocidad del ventilador, por lo que no fue necesaria la adquisición de datos de velocidad. El sistema de ventilación del Secador B estaba compuesto por el circuito descrito en la “Fig. 2”. Los ventiladores fueron conectados en serie al regulador solar, donde también fue conectado el panel solar, y la batería. Los detalles de estos equipos se observan en la sección de materiales. Bajo esta configuración, el Secador B funcionaría con una velocidad de flujo constante de 3 m/s, en ambos ventiladores.

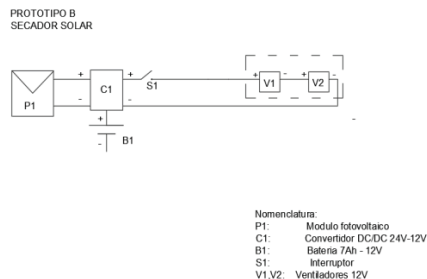


Fig. 2. Circuito de sistema de ventilación para prototipo de Secador Solar B. Fuente: Propia.

En cuanto a la instrumentación, se utilizaron equipos de adquisición de datos de temperatura en los Secadores A, B y en el de tipo invernadero. Para los Secadores A y B, los sensores se colocaron en tres posiciones dentro de la cámara de secado: a la salida del colector solar, en el centro de las bandejas de secado y antes de la salida de los ventiladores, como se describe en la “Fig. 3”. Mientras que en el secador tipo invernadero se colocó el equipo de adquisición de datos de temperatura con un solo sensor cerca de los granos de cacao, descrito en la “Fig. 6”. Adicionalmente, se colocó un sensor de humedad relativa con adquisición de datos en los Secadores A y B, en la parte inferior dentro de la cámara de secado para efectos de monitoreo (ver “Tabla1”).

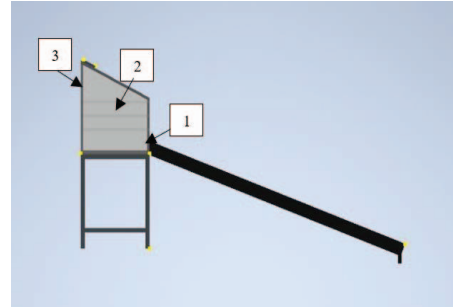


Fig. 3. Vista lateral de prototipo de secador solar mixto con las posiciones de los sensores de temperatura dentro de la cámara de secado. Sensor 1: Salida del colector solar, Sensor 2: Centro de la cámara de secado, Sensor 3: Salida de la cámara de secado. Fuente: Propia.

En el experimento se comparó el contenido de humedad en los granos de cacao de cada secador al igual que las temperaturas dentro de las cámaras. Para el caso de los Secadores A y B, se comparó la humedad de grano con respecto a su nivel de bandejas, al igual que las temperaturas en las diferentes posiciones dentro de la cámara de secado. El propósito de la comparación fue monitorear si los valores de temperatura se mantuvieron por debajo del valor máximo sugerido por [3], en cada uno de los secadores. Por otro lado, también se buscó comparar las curvas de secado en cada uno de los secadores y por nivel de bandejas, de manera que se puedan observar las diferentes tendencias que tienen los secadores. Como último propósito de la comparación, se monitoreó que los contenidos finales de humedad se encontraran entre el 6 y 8%, sugerido por [3].



Fig. 4. Prototipos construidos de Secador Solar A (Derecha) y B (Izquierda) junto a panel fotovoltaico (Centro). Fuente: Propia.



## B. Materiales

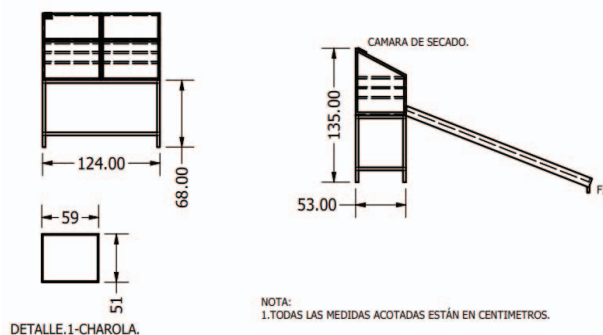
Los instrumentos utilizados para la medición de las diferentes variables y parámetros en este estudio se encuentran en la “TABLA I”.

TABLA I. INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN

Instrumento	Modelo	Exactitud
Sensor de Temperatura	88598 4ch K SD Logger	$\pm 0.3\% \pm 1^\circ\text{C}$
Sensor de Temperatura	Extech SDL200	$\pm 0.4\% + 1^\circ\text{C}$
Sensor de Humedad y Temperatura	Inkbird IBS-TH2	$\pm 0.3\% \pm 3\%$ RH
Anemómetro	TPI SP565	$\pm 5\%$
Balanza de Humedad	Mettler Toledo HB43	$\pm 0.01\%$
Balanza	EH-250	$\pm 1\text{g}$

Fuente: Propia.

Entre los equipos utilizados para la experimentación están los prototipos de secador solar mixto de circulación inducida. La estructura de ambos secadores está hecha de perfiles hierro de 1x1” con un espesor de 3/32”. La cámara de secado está cubierta con láminas de policarbonato y sellada con silicón. En el Secador Solar A, las láminas son de color gris claro, mientras que en el Secador Solar B son verdes. Los colectores de aire son de 1.7 m<sup>2</sup> de área neta de captación, con un solo acristalamiento. Las bandejas en el Secador Solar A están compuestas de aluminio remachado a una malla del mismo material. En el Secador Solar B, el marco de aluminio de las bandejas va remachado a una malla de poliestireno. Los detalles de las dimensiones del Secador Solar A se muestran en la “Fig.5”.



Las dimensiones del Secador Solar B son muy similares a las del Secador Solar A. Sin embargo, existen diferencias a tomar en consideración. La altura de la cámara de secado es de 135 cm y la altura a la que entra el colector es de 78 cm. Las bandejas son de 60x55 cm. El ancho y profundidad de la cámara de secado son de 128 y 63 cm, respectivamente.

El Secador Invernadero está compuesto de madera, con una cubierta plástica en la parte superior, como se muestra en la “Fig.6”. Dentro del secador la altura es de 1.83 m, mientras que la longitud y el ancho son de 3.72 y 3.43 m, respectivamente. El Secador Invernadero está ubicado a 1.33 m sobre el nivel del suelo.



Fig. 6. Secador Invernadero existente en la comunidad de Cilico Creek. Sensor de temperatura colocado en la posición 1. Fuente: Propia.

Para la extracción de aire de las cámaras de los Secadores A y B, se utilizaron tres ventiladores de 12 V, 4.2W con dimensiones de 120x120mm. Estos ventiladores pueden observarse en la “Fig. 7”. Se utilizó un panel solar, un regulador solar convertidor DC-DC y una batería de 12V, con capacidad de 7.0AH/20HR modelo Forza Power Technologies. Adicionalmente, para el control de velocidad del ventilador en el Secador A, se utilizó una celda solar de 21.5x18.5cm. Para moler las muestras de cacao se utilizó un molino Hamilton Beach.



Fig. 7. Vista posterior de prototipo de Secador Solar B con ventilador 1 (Derecha) y ventilador 2 (Izquierda). Fuente: Propia.

## C. Muestreo y Mediciones

Cada 24 horas se recolectaron muestras de cacao de cada secador para medir el contenido de humedad en los granos. Se tomaron muestras iniciales, previo al secado, para determinar el punto de partida del proceso. Se tomaron muestras al azar de 20 granos de cacao por nivel de bandejas (superior, medio e inferior), en los Secadores A y B. Estas muestras equivalen a masas entre 35.0 a 45.0  $\pm 1.0$  g. Esta masa sigue la proporción de muestreo sugerida por [3]. Las muestras fueron trasladadas, preparadas y analizadas en el Laboratorio de Ensayos de Materiales y Suelo (LEMS), del Centro Regional de Bocas del Toro de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), siguiendo los criterios de [10]. Luego, utilizando la balanza de humedad se midió el contenido de cada una de las muestras que se tomaron por nivel y por secador. Este procedimiento se repitió para cada día de secado, posterior a la recolección de muestras.

La velocidad de los ventiladores fue medida utilizando el anemómetro descrito en la “TABLA 1”. Estas mediciones fueron realizadas cada 24 horas, al mismo tiempo que la toma

de muestra de los granos de cacao. La velocidad de los ventiladores solamente fue medida en el prototipo de Secador Solar B. En el caso del prototipo de Secador Solar A, la velocidad del ventilador fue variable, debido a que se regulaba mediante la radiación incidente sobre la celda fotovoltaica.

Por otro lado, los datos de temperatura y humedad fueron descargados al finalizar la etapa de secado, lo cual corresponde al día 5 de la experimentación. Los datos de temperatura ambiental y radiación solar para los días de experimentación fueron descargados de [5].

#### D. Ecuaciones

La humedad adecuada en los granos de cacao se alcanza mediante el uso energía en forma de calor para lograr el proceso de evaporación de la masa de agua a remover. Previamente al secado, se calculan las variables de diseño para conocer los requisitos del sistema y cumplir con las necesidades del secado. El calor necesario para el proceso de secado del cacao es definido por [11], a continuación:

$$Q_p = C_p m_i (T_{fc} - T_i) \quad (1)$$

Donde  $Q_p$  representa el calor de precalentamiento del sistema (kJ);  $C_p$ , el calor específico a presión constante del cacao (kJ/kg °C);  $m_i$ , la masa inicial de cacao (kg);  $T_{fc}$ , la temperatura final de la cámara de secado y  $T_i$  la temperatura a la entrada del colector solar (°C). Luego, el calor necesario para evaporar  $Q_e$ , el contenido de agua en los granos de cacao se define como:

$$Q_e = h_f (m_i - m_f) \quad (2)$$

Donde  $h_f$  representa el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg);  $m_i$  y  $m_f$ , la masa inicial y final de cacao respectivamente (kg). Las pérdidas de calor  $Q_l$  son representadas por:

$$Q_l = (Q_p + Q_e) 10\% \quad (3)$$

Luego, el calor total  $Q_T$ , se define por:

$$Q_T = Q_p + Q_e + Q_l \quad (4)$$

Posterior a calcular el calor requerido, se determina el promedio del aumento necesario de temperatura de la cámara de secado  $\Delta T$ , con respecto a la temperatura ambiental, con la siguiente ecuación sugerida por [12]:

$$\Delta T = 2\beta(T_b - T_c)(I_r/I_o) \quad (5)$$

Donde  $\beta$  representa un parámetro adimensional de corrección de temperatura, entre 0.14 y 0.25, en donde se asume un valor de 0.20, sugerido por [12].  $T_b$  y  $T_c$ , representan la temperatura de ebullición y congelación del agua respectivamente (°C);  $I_r$ , la radiación incidente promedio sobre el colector solar (W/m²) y  $I_o$ , la constante solar de 1367 W/m².

Luego, se calcula el volumen total de aire  $V_a$  necesario para evaporar la masa de agua y llevar el contenido de humedad en los granos al nivel adecuado definido por:

$$V_a = (M_w h_f R_a T_a) / [C_{pa} P_a (T_o - T_{fa})] \quad (6)$$

Donde  $M_w$  representa la masa de agua a evaporar (kg);  $R_a$ , la constante de gases ideales 0.287 kJ/kg K;  $T_a$ , el promedio de la temperatura ambiental;  $C_{pa}$ , el calor específico del aire a presión constante;  $P_a$ , la presión parcial de aire seco en la atmósfera (kPa) y  $T_o$ , la temperatura de salida del colector solar, correspondiente a la entrada de la cámara de secado.  $T_{fa}$  representa la temperatura obtenida a partir del aumento necesario calculado con la relación  $T_{fa} = T_a + (0.25\Delta T)$  establecida por [12]. La presión parcial del aire seco en la atmósfera se determina mediante la relación establecida por [13], la cual establece que  $P = P_v + P_a$ , donde  $P$  es la presión total atmosférica y  $P_v$  es la presión de vapor.

Una vez calculado el volumen total necesario, [12] sugiere el cálculo del flujo volumétrico promedio  $G$ , mediante:

$$G = V_a / t \quad (7)$$

Donde  $t$  representa el tiempo de secado en segundos (s).

Luego de definir las variables de diseño para conocer los requisitos del sistema, se calculan las variables de operación para los prototipos de secadores solares mixtos. Los sistemas de secado se analizan como un volumen de control. El prototipo de Secador Solar A cuenta con una sola entrada y salida, mientras que el Secador Solar B cuenta con sola entrada y dos salidas. La entrada de estos sistemas corresponde a la entrada del colector solar, mientras que las salidas corresponden a los ventiladores en la parte posterior de las cámaras de secado. Se utilizan valores de calor específico y densidad del aire promedios, con tal de simplificar los cálculos del calor total transferido en la cámara de secado, utilizando la ecuación descrita a continuación, sugerida por [13]:

$$Q = C_{pa} \dot{m} (T_{fc} - T_i)(t) \quad (8)$$

Donde  $\dot{m}$  representa el flujo másico de aire a través del sistema (kg/s). El flujo másico se define por:

$$\dot{m} = \rho G_o \quad (9)$$

Donde  $\rho$  representa la densidad promedio del aire a través del sistema (kg/m³). En el sistema, el flujo volumétrico  $G_o$ , se define por:

$$G_o = v (\pi/4) d^2 \quad (10)$$

Donde  $v$  representa la velocidad de aire a la salida del ventilador (m/s) y  $d$ , el diámetro de la salida del ventilador (m).

Una vez definido el flujo volumétrico, se puede calcular el volumen de aire total utilizando “(7)”.

El aumento de temperatura promedio del sistema  $\Delta T$ , sobre la temperatura ambiental se define a continuación:

$$\Delta T = T_f - T_a \quad (11)$$

Donde  $T_a$  representa la temperatura ambiental promedio y  $T_f$  representa la temperatura promedio en la cámara de secado (°C).

Otras variables fundamentales del sistema son las de rendimiento. La eficiencia del sistema de secado  $\eta$ , es definida por [14], a continuación:

$$\eta = (M_w h_f) / (I_a c \tau_a + I_a s c \tau_a + P_f) \quad (12)$$

Donde  $I$  representa la radiación solar total incidente sobre las superficies en forma de energía ( $\text{kJ/m}^2$ );  $A_c$  y  $A_{sc}$ , el área del colector y el área de la cámara de secado respectivamente ( $\text{m}^2$ );  $\tau_a$ , la transmisividad y absorptividad del material y  $P_f$ , la energía total consumida por el ventilador ( $\text{kJ}$ ).

El consumo específico de energía [7] lo define como la energía total suministrada SEC, por unidad de masa de agua removida ( $\text{kWh/kg}$ ). Se considera la energía térmica por radiación y el trabajo de los ventiladores, y se describe a continuación:

$$\text{SEC} = E_T/M_w \quad (13)$$

Por último, la capacidad experimental de cada uno de los secadores representa la masa inicial de cacao en cada secador entre el área de bandejas o superficie en la que se seca. Esta cantidad se expresa en términos de masa de los granos por unidad de área de secado.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente a partir de cada uno de los secadores se presentan en las “Fig. 8, 9 y 10”. En las mismas se visualizan los contenidos de humedad en los granos de cacao en porcentaje, durante de los días de secado. Para los prototipos de Secador Solar A y B, se muestra el contenido de humedad por nivel de bandejas.

En la “Fig.8” se muestra la curva de secado del Secador Invernadero. Dentro del primer día de secado, la curva presentó una mayor pendiente, lo cual se traduce en una mayor razón de secado. Sin embargo, durante los próximos días, la pendiente disminuyó hasta llegar a su valor final al quinto día de secado.

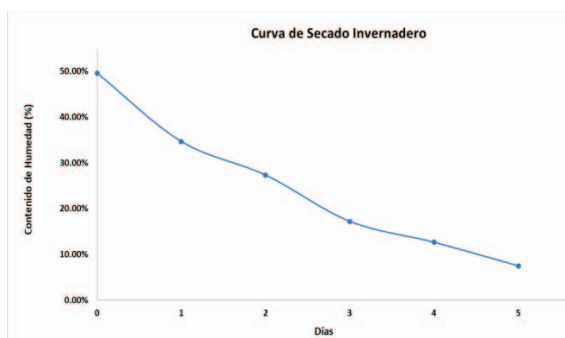


Fig. 8. Gráfico de curva de secado de Secador Invernadero. Fuente: Propia.

En la “Fig.9” se puede observar el gráfico con curvas de secado para cada nivel de bandejas en el Secador Solar A. En este sistema, el Nivel Superior e Inferior muestran una curva de secado muy similar. Sin embargo, el contenido de humedad del Nivel Medio de las bandejas se encuentra muy por encima del resto. Este comportamiento se da a lo largo de todo el periodo de secado, hasta el último día, donde los tres niveles de bandejas alcanzan contenidos de humedad similares. Para el Secador Solar A, los contenidos de humedad finales fueron de 7.16, 7.75 y 7.00% para el Nivel Superior, Medio e Inferior respectivamente.

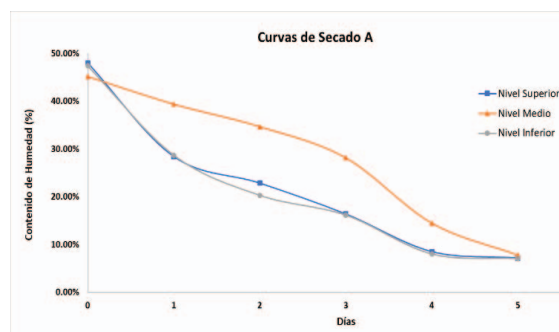


Fig. 9. Gráfico de curva de los diferentes niveles de bandejas del Secador A. Fuente: Propia.

En la “Fig.10” se muestran las curvas de secado con respecto a cada nivel de bandejas del Secador Solar B. El Nivel Superior e Inferior muestran igualmente una curva similar, mientras que la curva del Nivel Medio se encuentra por encima. Este comportamiento se da principalmente entre los días 1 y 3 del periodo de secado. Sin embargo, no es tan notable como en el Secador Solar A. Para el Secador Solar B, los contenidos de humedad finales fueron de 10.48, 11.28 y 9.17% para el Nivel Superior, Medio e Inferior respectivamente.

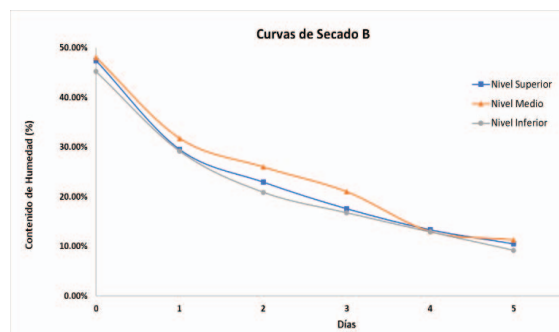


Fig. 10. Gráfico de curva de los diferentes niveles de bandejas del Secador B. Fuente: Propia.

En ambos prototipos de secador solar mixto, el comportamiento del secado fue similar para el Nivel Superior e Inferior de bandejas. Esto se debe a que en el Nivel Inferior predomina el calor proveniente del colector solar, mientras que en el Nivel Superior predomina el calor absorbido por la radiación incidente sobre la cámara de secado.

En la “Fig.11” se presentan las curvas de los tres diferentes secadores utilizados durante el secado en este estudio. Se puede observar que los contenidos iniciales de humedad corresponden a 46.88% para el Secador Solar A, 45.20% para el Secador Solar B y 48.58% para el Secador Invernadero. Las tres curvas describen un comportamiento y una razón de remoción de humedad similar. El contenido final de humedad en los granos de cacao en el Secador Solar A fue de 7.30%, para aquellos en el Secador Solar B fue de 10.31% y en los del Secador Invernadero fue de 7.48%. Observando estos resultados, cabe destacar que el contenido final de humedad del Secador Solar B se encuentra por encima del rango sugerido por [3], mientras los otros dos secadores sí cumplen con valores dentro del rango.

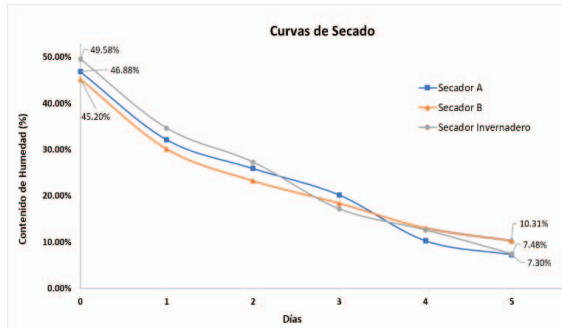


Fig. 11. Gráfico de curvas del proceso de secado de los tres secadores. Fuente: Propia.

La “TABLA II” presenta los resultados de medición de temperatura máxima, mínima y promedio registrado dentro diferentes puntos de la cámara de los secadores solares mixtos descritos en la “Fig. 3”, al igual que en el Secador Invernadero durante los días de secado.

TABLA II. TEMPERATURAS EN LOS SECADORES (°C)

	Posición	Max	Min	Prom
	Secador Invernadero	49.9	23.0	30.1
Secador Solar A	Salida de Colector	62.7	23.4	31.0
	Centro de la Cámara	58.7	23.4	32.2
	Salida de la Cámara	64.7	23.1	31.3
Secador Solar B	Salida de Colector	63.5	23.4	30.0
	Centro de la Cámara	55.5	23.3	29.3
	Salida de la Cámara	52.9	23.3	29.4

Fuente: Propia.

Se observa en la “TABLA II” que las temperaturas mínimas en los tres secadores son similares. Por otro lado, el Secador Solar A registró temperaturas promedio superiores a las del Secador Solar B y a las del Secador Invernadero. También, el Secador Solar A registró las temperaturas máximas del proceso. Sin embargo, tanto el Secador Solar A, como el B, excedieron el límite superior de temperatura de 60°C sugerido por [3].

Las velocidades promedio medidas durante el periodo de secado en los ventiladores 1 y 2 en el prototipo de Secador Solar B fueron de 3.10 y 2.81 ± 0.03 m/s.

Los cálculos de variables de diseño propuestos por [11], se realizaron en base a las necesidades de disminución de contenido de humedad en los granos de cacao. Los contenidos iniciales de humedad en cada secador pueden observarse en “Fig. 11”. Se estableció un contenido final de humedad de 7% para el cálculo de las variables de diseño en los prototipos de Secador Solar A y B, ya que corresponde al valor sugerido por [3].

Los calores totales requeridos para llevar a cabo la disminución del contenido de humedad en los granos de cacao fueron de 17.8 y 15.6 MJ para los prototipos de Secador Solar A y B, respectivamente. El aumento necesario de temperatura promedio de la cámara de secado sobre la temperatura ambiental fue de 5.2 °C, para ambos casos. Los volúmenes de aire total necesarios a través de los sistemas fueron de 474.0 y 846.5 m³ para los prototipos de Secador Solar A y B. En base

al volumen de aire requerido y el tiempo de secado, los flujos volumétricos de aire requeridos fueron de 0.001 y 0.002 m³/s para los prototipos de Secador Solar A y B, respectivamente.

Los cálculos de variables de operación del sistema de secado fueron realizados en base a los contenidos de humedad y las temperaturas medidas durante el proceso de secado. Los cálculos de flujo volumétrico, flujo másico, volumen y calor total transferido se realizaron solamente para el prototipo de Secador Solar B.

El calor total aportado en el sistema del prototipo de Secador Solar B fue de 74.5 MJ. Este valor representa casi cinco veces el calor requerido por las condiciones del sistema para llevar a cabo el secado de 18kg de granos de cacao fermentados. El volumen de aire a través del sistema fue de 28875.1 m³, superando la cantidad de aire requerida por el sistema. El flujo volumétrico y el flujo másico fueron de 0.067 m³/s y 0.078 kg/s, respectivamente.

Los aumentos de temperatura promedio medidos en los prototipos de Secador Solar A y B fueron de 3.8 y 2.2°C respectivamente. Ambos valores se encuentran por debajo del aumento de temperatura sugerido por [12]. Esto afecta el secado de manera que en los periodos donde la diferencia de temperatura es mínima, el flujo de calor no es suficiente para la evaporación de la masa de agua en los granos de cacao.

Las eficiencias calculadas de los sistemas de secado fueron de 26.74 y 22.82% para los prototipos A y B. Los consumos específicos de energía en los sistemas A y B fue de 2.35 y 2.75 kWh/kg respectivamente.

Las capacidades de secado, obtenidas experimentalmente, fueron de 9.97, 9.09 y 1.50 kg/m² para el Secador Solar A, Secador Solar B y Secador Invernadero, respectivamente.

El Secador Solar A mostró una mayor eficiencia que el Secador Solar B debido a que alcanzó un menor contenido de humedad en los granos de cacao, durante el mismo periodo. Adicionalmente, el Secador Solar A, mostró un menor consumo específico de energía, al utilizar solamente un ventilador, mientras que el Secador Solar B utilizó dos ventiladores.

#### IV. CONCLUSIONES

El objetivo del estudio fue evaluar el funcionamiento de un prototipo de secador solar de cacao tipo mixto de circulación inducida en la comunidad de Cilico Creek, comarca Ngäbe Buglé. La evaluación consistió en dos partes. Primero, compararon las temperaturas y contenido de humedad en los granos de cacao en tres diferentes secadores solares, durante un periodo de secado de cinco días. Segundo, se calcularon las variables de diseño y operación en el Secador Solar B, objeto sujeto a evaluación.

Los resultados mostraron que la humedad final en los granos de cacao del Secador Solar B se encontró por encima del rango sugerido por [3], mientras que las humedades de los granos de cacao en el Secador Solar A y el Secador Invernadero sí cumplieron dentro de los valores en el rango sugerido. Las temperaturas máximas en los Secadores A y B superaron el límite máximo recomendado, medida en la posición de la salida de colector solar. Sin embargo, las temperaturas en el centro de la cámara de secado se mantuvieron dentro del límite, en los Secadores A y B.



El aumento promedio de temperatura del Secador Solar B fue menor al aumento promedio necesario para el secado, sugerido por [11]. Por otro lado, el calor total suministrado al sistema fue superior al calor total necesario para el secado de los granos de cacao. El volumen de aire a través del sistema del excedió igualmente el volumen de aire necesario. Por último, la capacidad del Secador Solar B fue mayor a la del Secador Invernadero, pero menor a la del Secador Solar A.

Basado en los resultados de este estudio, la operación del Secador Solar B cumplió con las variables de diseño, con excepción al aumento promedio de temperatura sobre la temperatura ambiental. Se recomienda realizar pruebas de secado con ventiladores a velocidades inferiores a 3 m/s, debido a que el volumen total de aire a través del sistema excedió considerablemente el volumen requerido. Por otro lado, se recomienda implementar el uso de fuentes auxiliares de calor sensible para mantener la temperatura de la cámara de secado en periodos nocturnos y/o de poca radiación y bajas temperaturas. El estudio demostró que el prototipo de Secador Solar B posee una mayor capacidad de secado con respecto al Secador Invernadero. Esto, junto con la protección que ofrece el sistema contra agentes exteriores, representa una ventaja sobre el método implementado en la comunidad. Al mejorar los resultados experimentales e incorporar evaluaciones estadísticas y económicas, se mejoraría la productividad y calidad del cacao en la comunidad de Cilico Creek, a partir del uso de estas tecnologías de energía renovable.

#### V. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento a través del proyecto IDDSE19-012. Al personal del Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI) por el apoyo en las actividades realizadas. A los miembros de la Cooperativa Solary R.L. por el apoyo y el espacio otorgado para realizar las pruebas experimentales de secado. A Darla Calderón, Constantino Gollini y Abelardo Franco por el apoyo en las actividades realizadas. Al Centro Regional de Bocas del Toro de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) por el apoyo en transporte, personal e instrumentos. Al Laboratorio de Ensayos de Materiales y Suelo (LEMS) por el apoyo en instrumentos, equipos y espacio para realizar la experimentación. Al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP) por el apoyo en logística y al Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA) por el apoyo en la etapa de fermentación del cacao.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] Observatorio del Cacao, "Origen y cultivo del cacao natural." <http://www.observatoriodelcacao.com/origen/>
- [2] Barry Callebaut, "Theobroma cacao, the food of the gods." <https://www.barry-callebaut.com/es-MX/group/media/press-kit/theobroma-cacao-food-gods>
- [3] H. Aguilar, "Manual para la Evaluación de la Calidad del Grano de Cacao," *Cent. Comun. Agrícola*, no. 19, pp. 12–14, 2016, [Online]. Available: [http://www.fhia.org.hn/downloads/cacao\\_pdfs/Manual\\_para\\_la\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_Calidad\\_del\\_Grano\\_de\\_Cacao.pdf](http://www.fhia.org.hn/downloads/cacao_pdfs/Manual_para_la_Evaluacion_de_la_Calidad_del_Grano_de_Cacao.pdf).
- [4] Municipios y distritos de Panamá, "Jirondai en la region de Ngäbe-Buglé." <https://www.distrto.com.pa/distrto-jirondai.html#>
- [5] NASA, "POWER | Data Access Viewer Prediction of Worldwide Energy Resource." <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [6] J. Yenque D. and N. Cancino V., "Tipos de Secadores Solares," *Industrial Data*, vol. 4, no. 2, p. 91, 2014, doi: 10.15381/idata.v4i2.6776.
- [7] S. Vijayan, T. V. Arjunan, and A. Kumar, "Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 36, pp. 59–67, 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.014.
- [8] D. Ortiz, J. Bastidas, J. Acosta, Ruales Carlos Frank, and C. Herrera, "Implementación de un secador de cacao a pequeña escala para disminuir el tiempo de secado y conservar las propiedades organolépticas en el Consejo Comunitario Las Varas Tumaco (Nariño)," vol. 2, pp. 1–9, 2019.
- [9] C. A. Komolafe, M. A. Waheed, S. I. Kuye, B. A. Adewumi, and A. O. Daniel Adejumo, "Thermodynamic analysis of forced convective solar drying of cocoa with black coated sensible thermal storage material," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, no. June, p. 101140, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101140.
- [10] ISO, "ISO 2292:2017 Cocoa beans — Sampling," 2017. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2292:ed-2:v1:en>
- [11] Y. Qiu, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, X. Luo, and Q. Yu, "Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system," *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 225–235, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.016.
- [12] F. K. Forson, M. A. A. Nazha, F. O. Akuffo, and H. Rajakaruna, "Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2306–2319, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.12.003.
- [13] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 8va edición. México: Mc Graw Hill, 2015.
- [14] J. P. Ekka, K. Bala, P. Muthukumar, and D. K. Kanaujiya, "Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates," *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 55–66, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.035.