

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR
INFLABLE DE BOLSA PARA EL SECADO DE CACAO**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

**Br. Roberto Enrique Tenorio-Herrera
Br. María Carolina Urbina-Cornavaca**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR:

MPhil. Ing. Rodolfo Agenor Espinoza Morales

Managua, Nicaragua
Febrero 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia y especialmente a mi madre, la Sra. Carla María Herrera Cantarero y a mi padre, el Sr. José Luis Hurtado (q.e.p.d); ellos siempre fueron un apoyo en todos los aspectos de mi vida incluyendo este trabajo. Agradezco a mi compañera de tesis, la Srta. María Carolina Urbina Cornavaca, con quien emprendí este trabajo monográfico y cuyos aportes fueron cruciales para la culminación del mismo. Así mismo, a la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, y a todos los docentes que laboran en esta excelsa alma mater, quienes en su honorable labor de docencia me proporcionaron sus valiosos conocimientos. Dentro del cuerpo de docentes de la UNI, quiero agradecer de manera muy especial al MSc. Ing. Rodolfo Agenor Espinosa Morales, quien fue un pilar invaluable para el desarrollo de este estudio monográfico. También, doy mis agradecimientos al equipo interdisciplinario. Además, doy mis agradecimientos al Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA, el cual brindó el acompañamiento y financiamiento necesario para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, agradezco a la Sra. Eufemia Woo, destacada productora de cacao, quien amablemente proporcionó un espacio en su finca y parte de su maravilloso cacao para este estudio.

Br. Roberto Enrique Tenorio Herrera

Para iniciar, quisiera agradecer a mi familia, en especial a mi padre el Lic. Cristóbal Urbina Barrios, y a mi madre la Lic. Yadira de los Ángeles Cornavaca; por su apoyo incondicional y todos los granitos de arena que han aportado para mi formación en cada etapa de mi vida. A mi compañero de tesis, el Br. Roberto Enrique Tenorio Herrera, con quien compartí esta travesía y quien me enseñó a ser perseverante; con él afronté todos los sacrificios que conllevó la culminación de este estudio monográfico. Agradezco de forma muy especial a mi tutor, MSc. Ing. Rodolfo Agenor Espinosa Morales, quien siempre mostró mucha paciencia, ternura, comprensión, constancia y entrega; su guía fue imprescindible para culminar este trabajo. De igual manera, presento mis agradecimientos al equipo interdisciplinario que participaron en el desarrollo de este trabajo. Al MSc. Ing. Geniel Andrés Talavera Blandón, el cual es mi mejor amigo y quien fue un buen compañero a lo largo de la carrera universitaria. A mi hermano el Ing. Cristóbal Ezequiel Urbina Cornavaca y al Ing. William Rivas Baltodano. A UNI-RUSB, por permitirme pertenecer a esta prestigiosa alma mater, y por haber dado el acceso al Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química, FIQ. Al INTA por su patrocinio e involucramiento en esta investigación. Por último, a la Sra. Eufemia Woo por abrir las puertas de su finca, por haber demostrado interés genuino y por su gran contribución en el sector cacaotero.

Br. María Carolina Urbina Cornavaca

DEDICATORIA

Este trabajo monográfico se lo dedico con mucho amor a mi madre, la Sra. Carla María Herrera Cantarero.

También, a mi abuelo, el Sr. Sabino de Jesús Herrera Siles (q.e.p.d), y a mi padre, el Sr. José Luis Hurtado (q.e.p.d). Ambos fueron de apoyo e inspiración en mi vida, siempre los recordaré y amaré con todo el corazón.

“Los seres queridos que perdemos no reposan bajo la tierra, sino que los llevamos en el corazón”

-Alexandre Dumas-

Br. Roberto Enrique Tenorio Herrera

A mi padre Cristóbal Urbina Barrios por haber criado hijos de bien, y por siempre creer en mí.

Br. María Carolina Urbina Cornavaca

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

Tengo a bien presentar al honorable jurado a los bachilleres Roberto Enrique Tenorio Herrera y María Carolina Urbina Cornavaca, autores del trabajo monográfico titulado “Evaluación de un Prototipo de Secador Solar Inflable de Bolsa para el Secado de Cacao”, el cual fue desarrollado como parte del Convenio de Colaboración entre la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA. Por parte de la UNI, se involucraron estudiantes-tesistas y docentes-tutores de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Agrícola e Ingeniería Química.

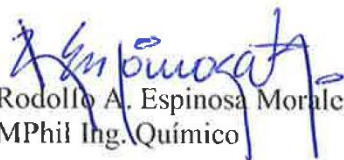
El enfoque en el desarrollo de un prototipo de secador solar inflable de bolsa demuestra una comprensión de los desafíos que enfrentan los productores de cacao en términos de secado eficiente y sostenible. La elección de utilizar energía solar como fuente de calor para el proceso de secado es particularmente acertada, ya que contribuye a reducir los costos de energía y el impacto ambiental en comparación con métodos convencionales.

Uno de los aspectos más destacados de esta tesis es el enfoque práctico y experimental. La evaluación del prototipo de secador solar inflable implica la recopilación y el análisis de datos, lo cual es fundamental para respaldar los hallazgos y las conclusiones obtenidas. La metodología utilizada para evaluar la eficiencia de secado, la calidad del producto final y otros parámetros relevantes es rigurosa y adecuada.

La investigación también aborda un problema importante en la cadena de suministro de cacao al considerar las necesidades específicas de los productores y las condiciones ambientales en las que operan.

Con esta solución innovadora, portable y construida en nuestro país, de un secador solar inflable de bolsa se cuenta con mayor potencial para mejorar la calidad del cacao seco, reducir las pérdidas, contribuyendo así a la sostenibilidad de su producción. Su capacidad de innovación y desarrollo en el campo agropecuario ha sido reconocida a nivel nacional al obtener tanto el primer lugar en el 3^{er} Certamen Regional a la Innovación Agropecuaria "Agroinnovación 2021" (Managua, 12/06/2021), como otro primer lugar en el 3^{er} Certamen Nacional a la Innovación Agropecuaria "Agroinnovación 2021" (Juigalpa, 28-29/10/2021).

Por mi parte, agradezco a Roberto y Carolina el haberse incorporado y trabajado en un equipo multidisciplinario de la UNI con el cual se logró dar respuesta a la propuesta de innovación planteada por el INTA. No me queda más que solicitar atentamente al honorable jurado acepten este trabajo como último requisito para obtener el título de Ingeniero Químico y otorguen el grado de aprobado a los bachilleres Roberto Tenorio y María Urbina.


Rodolfo A. Espinosa Morales
MPhil Ing. Químico

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó un prototipo de secador solar inflable de bolsa. Una vez construido, el prototipo se evaluó experimentalmente secando cacao recién fermentado, mediante la determinación de los parámetros: características físicas, desempeño térmico, eficiencia energética y calidad del cacao procesado.

Este prototipo es un túnel semicilíndrico, clasificado como secador solar híbrido directo y activo, de baja temperatura. Tiene un fondo de lona vinílica impermeable reforzada con fibra de poliéster y recubrimiento de PVC, color negro; y cubierta de plástico UV-ATG 50%, color blanco. Ambas partes se unen mediante una cremallera de alta resistencia. Su longitud total es de 6.15 m y ancho 2.00 m; área útil de secado 8.82 m², con capacidad para 177 kg de cacao recién fermentado. Cuenta con un sistema fotovoltaico para suministrar energía a un ventilador y una resistencia eléctrica. Los sensores incorporados permiten la medición de propiedades del grano y del aire desecante. El costo total de construcción fue de C\$ 63,784.

Durante la evaluación del prototipo, 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 horas acumuladas de exposición solar. A su paso por el secador, a una velocidad promedio de 0.017 m/s, el aire desecante incrementaba su temperatura en rangos de 2°C hasta 20°C; y reducía su humedad relativa entre 20 y 30 puntos porcentuales, con respecto a sus valores en la entrada. Por su parte, la temperatura del grano siempre estuvo por debajo del límite máximo permitido de 65°C.

En el caso de la eficiencia energética promedio del prototipo de secador, su valor disminuyó conforme se reducía la humedad del grano al avanzar los días: desde 72.63%, el primer día, hasta 8.51%, el quinto día. Los resultados de la evaluación físico-sensorial indican que el cacao obtenido en esta investigación tiene una calidad aceptable para elaborar chocolate.

Con este trabajo monográfico se comprobó que el cacao recién fermentado puede ser secado satisfactoriamente en un secador solar inflable de bolsa. Adicionalmente, este prototipo puede ser aprovechado para el secado de otros productos agrícolas, como por ejemplo granos básicos.

ÍNDICE

	AGRADECIMIENTOS.....	i
	DEDICATORIAS.....	ii
	RESUMEN.....	iii
	OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA.....	iv
I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
III	MARCO DE REFERENCIA	3
3.1	AGROECOLOGÍA DEL CACAO EN NICARAGUA	3
3.2	BENEFICIADO DEL CACAO	4
3.3	FERMENTACIÓN DEL CACAO.....	5
3.4	SECADO DEL CACAO	8
3.4.1	Humedades en el Grano de Cacao	8
3.4.2	Métodos de Secado para el Cacao.....	8
3.4.3	Velocidad de Secado del Cacao	9
3.4.4	Tiempo de Secado para el Cacao	9
3.4.5	Curvas Relacionadas con el Secado del Cacao.....	11
3.5	SECADORES SOLARES	15
3.5.1	Tipos de Secadores Solares.....	15
3.5.2	Secador de Burbuja Solar	17
3.6	EVALUACIÓN DE SECADORES SOLARES.....	18
3.6.1	Características Físicas	19
3.6.2	Desempeño Térmico.....	19
3.6.3	Eficiencia de Secadores Solares.....	24
3.6.4	Calidad del Producto Secado	25
3.6.5	Análisis Económico.....	26
IV	METODOLOGÍA.....	27
4.1	DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SECADOR.....	27
4.1.1	Características Físicas del Prototipo de Secador.....	28
4.1.2	Pruebas de Funcionamiento de los Sensores y Regulación del Ventilador...28	
4.2	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR	29
4.2.1	Evaluación del Desempeño Térmico del Prototipo.....	30

4.2.2	Evaluación de la Eficiencia Energética del Prototipo	32
4.2.3	Evaluación de la Calidad del Cacao	33
V	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
5.1	DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SECADOR	35
5.1.1	Características Físicas del Prototipo de Secador	36
5.1.2	Pruebas de Funcionamiento de los Sensores y Regulación de Ventilador	38
5.2	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR	38
5.2.1	Verificación del Funcionamiento del Prototipo	39
5.2.2	Evaluación del Desempeño Térmico del Prototipo	40
5.2.3	Evaluación de la Eficiencia Energética del Prototipo	50
5.2.4	Evaluación de la Calidad del Cacao	51
VI	CONCLUSIONES	53
VII	RECOMENDACIONES	54
VIII	NOMENCLATURA	55
IX	BIBLIOGRAFÍA	57
X	ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Macro regiones agroecológicas de Nicaragua.....	3
Figura 3.2 (a) Dinámica del conglomerado microbiano; y (b) degradación de sustrato con cinética de producción de metabolito durante el proceso de fermentación espontánea de granos de cacao.. ..	6
Figura 3.3 (a) Efecto de la temperatura del aire de secado sobre el contenido de humedad (en base seca por cien); y (b) sobre la velocidad de secado del cacao.	11
Figura 3.4 (a) Humedad del cacao; y (b) velocidad de secado.	12
Figura 3.5 Curva de secado y velocidad de secado.. ..	12
Figura 3.6 Velocidad de secado con velocidad del aire de 0.6 m/s (rombos) y 1 m/s (círculos) a 60°C; velocidad del aire de 0.6 m/s a 30°C (cuadrados).....	13
Figura 3.7 Humedad (%) de cacao durante el secado dentro y fuera del prototipo.	14
Figura 3.8 (a) Isotermas de desorción de los granos de cacao fermentados; (b) isotermas experimentales de adsorción	15
Figura 3.9 Modelo de Secador de Burbuja Solar con fuente de energía fotovoltaica..	17
Figura 3.10 Secador solar de túnel para secar pequeñas cantidades.	18
Figura 3.11 Secador solar de túnel para secar grandes cantidades.....	18
Figura 3.12 Gráfica de velocidad de secado: (a) Contenido de humedad del grano de cacao en base húmeda respecto al tiempo; y (b) razón de pérdida de humedad del grano (humedad/humedad inicial).....	19
Figura 3.13 Comparación de la temperatura del aire dentro y fuera del secador como función de la hora local.....	20
Figura 3.14 Comparación de la humedad relativa del aire dentro y fuera del secador como función de la hora local.....	20
Figura 3.15 Temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del prototipo y humedad del grano respecto hora local y días de secado.	21
Figura 3.16 (a) Humedad relativa y (b) temperatura del aire a lo largo del secador.....	21
Figura 3.17 Perfil de temperatura del aire respecto a la longitud del secador y el tiempo.	22
Figura 3.18 Irradiancia y temperatura en el secador como función del tiempo.....	23
Figura 3.19 Irradiancia, temperatura y diferencia de temperaturas como función del tiempo.	23
Figura 4.1 Esquema del prototipo de 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.	31
Figura 5.1 Variación de la humedad de los granos de cacao, en base seca (gráficas superiores), y de la temperatura del lecho de cacao (gráficas inferiores), como función de la hora local, para los cinco días de secado.....	42
Figura 5.2 Humedad en base seca del cacao como función de las horas acumuladas de exposición solar.....	43
Figura 5.3 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.	46

Figura 5.4 Humedad absoluta del aire como función de la hora local, para los cinco días de secado.	48
---	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Protocolos de fermentación para cacao según la variedad	7
Tabla 3.2 Tipos de secadores solares.....	16
Tabla 5.1 Características físicas del prototipo de secador solar.....	37
Tabla 5.2 Eficiencia energética promedio diaria del prototipo de secador con y sin considerar el ventilador.....	50
Tabla 5.3 Clasificación de los granos de cacao en base al porcentaje máximo de granos con cinco defectos.	52
Tabla 5.4 Especificaciones del grano de cacao seco según los requerimientos de calidad.	52

I INTRODUCCIÓN

El cacao nicaragüense ha logrado ubicarse en los mercados internacionales de cacao fino, especialmente en el mercado europeo en el cual recibe excelentes precios por su calidad y fineza (ProDeSoC, 2006; La Prensa, 2016). Durante la última década, la promoción del cultivo y producción del cacao en Nicaragua ha sido tema de interés, llegando inclusive a considerarse como uno de los productos de exportación del futuro. Por tanto, es de esperarse un crecimiento en la producción de dicho rubro (El Nuevo Diario, 2018).

Al igual que el café, el cacao requiere de beneficiado, que contempla fermentación y secado. Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante estas dos operaciones mejoran la calidad del grano (Johnson, Bonilla, & Agüero, 2010). Al final de la fermentación, los granos de cacao pueden tener una humedad del 50% a 55% en peso. Para su almacenamiento, transporte y manejo, sin riesgo de deterioro, la humedad del cacao debe reducirse hasta 6.5 – 8%, en dependencia del mercado (INTA, 2009; IPADE, 2017).

El método más barato y sencillo de secado, utilizado por los pequeños productores, es tender los granos al sol (INTA, 2009). Sin embargo, este método es altamente 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).

Alternativamente, algunos productores realizan el secado en marquesinas o con secadores tipo samoa. 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 se corre 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 productores que no pueden realizar por su cuenta la fermentación y el secado, optan por vender a centros de acopio el cacao en baba. Evidentemente, el precio del cacao en baba es una fracción del cacao beneficiado y por tanto las ganancias del productor son bajas (MEFCCA y Cooperación Suiza en América Central, 2018a y 2018b).

El Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA, ha identificado los inconvenientes y limitantes mencionados previamente. Por tanto, como parte de la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Cacao-cultura Nicaragüense (2017-2021), su Departamento de Investigación en Alimentos y Postcosecha propuso a la UNI trabajar en el desarrollo de un secador solar destinado al secado de cacao.

Para el impulso de esta innovación se creó un equipo de trabajo interdisciplinario con estudiantes-tesistas y docentes-tutores de tres ingenierías: Electrónica, Agrícola y Química; quienes diseñaron un prototipo de secador solar inflable de bolsa. Una vez construido el prototipo, el equipo de Ingeniería Química realizó su evaluación experimental secando cacao recién fermentado.

II OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar un prototipo de secador solar inflable de bolsa destinado a mejorar el proceso de secado del cacao en las zonas productoras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar un prototipo del secador solar inflable para el secado de cacao recién fermentado.
- Seleccionar los materiales disponibles en el mercado nacional para la construcción del prototipo de secador.
- Establecer los costos de construcción del prototipo de secador.
- Evaluar el desempeño térmico del prototipo de secador.
- Determinar la eficiencia energética del prototipo de secador para el secado del cacao.
- Establecer la calidad del grano de cacao procesado en el prototipo de secador.

III MARCO DE REFERENCIA

3.1 AGROECOLOGÍA DEL CACAO EN NICARAGUA

La producción agrícola en Nicaragua es muy variada gracias a la diversidad de las condiciones biofísicas del país en cuanto a precipitaciones, temperatura, altitud, pendientes, entre otros. Se constituyen siete macro regiones (Figura 3.1), en las cuales se distribuyen diferentes rubros productivos (Fréguin-Gresh, 2017).

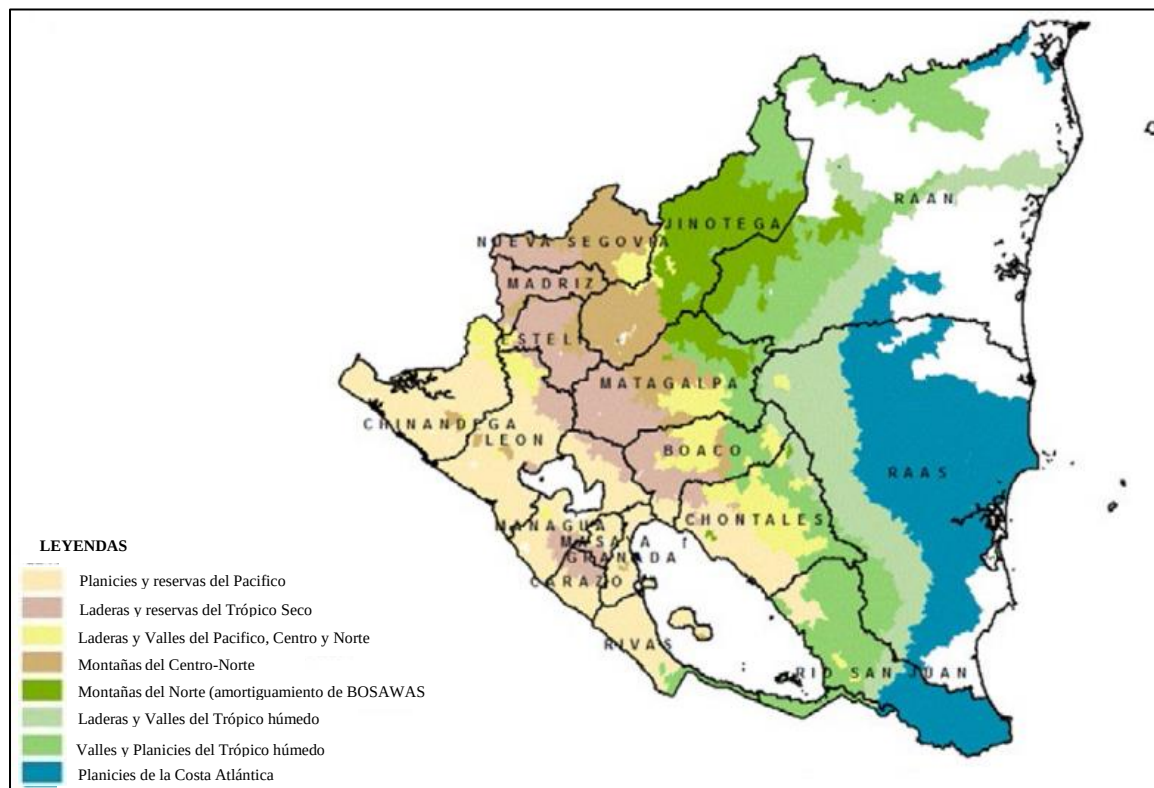


Figura 3.1 Macro regiones agroecológicas de Nicaragua. Tomado de Fréguin-Gresh (2017), sin número de figura.

La producción de cacao en Nicaragua se encuentra en tres de las macro regiones: la primera corresponde a las laderas y valles del trópico húmedo; la segunda macro región la conforman los valles y planicies del trópico húmedo; y finalmente, las montañas del norte, también conocidas como amortiguamiento de BOSAWAS. Por su parte, estas regiones tienen temperaturas alrededor de los 25°C. Las precipitaciones rondan valores de entre 1200 mm hasta 2800 mm (Fréguin-Gresh, 2017).

El INTA (2009) menciona las siguientes regiones, departamentos, municipios y comarcas o comunidades que presentan productividad de cacao:

- RAAN: Waslala, Waspan, Triángulo Minero y Prinzapolka.

- RAAS: Desembocadura del Río Grande de Matagalpa, Bluefields, La Cruz de Río Grande, El Rama, Muelle de los Bueyes, Nueva Guinea y Kukra Hill.
- Jinotega y Matagalpa: El Cuá, Bocay, Rancho Grande, La Dalia, Matiguás, Río Blanco, Muy Muy.
- Chontales y Río San Juan: Villa Sandino, La Libertad, Santo Domingo, El Castillo, San Carlos, Papaturro.
- También se tienen microzonas en los departamentos de Rivas, Granada, Masaya, Carazo, Volcan Mombacho, Isla de Ometepe, Chinandega y Posoltega.

Variedad del Cacao Cultivado en Nicaragua

En Nicaragua se producen tres variedades de cacao: criollo, trinitario y forastero. El cacao criollo es un tipo de cacao de alta calidad y de propiedades organolépticas muy agradables, con notas frutales. Sin embargo, es un tipo de cacao muy susceptible a enfermedades y además es de poca productividad. Actualmente el INTA está trabajando para certificar un cacao de origen criollo de Nicaragua (INTA, 2009).

Por su parte, el cacao forastero es considerado como un cacao con sabor muy ordinario y amargo. Por último, se tiene al cacao trinitario el cual se produce en mayor cantidad en el continente americano. Es un cacao considerado como híbrido natural del criollo y del forastero. Este cacao tiene una productividad mayor al forastero y al criollo; presenta variedades de clones de él mismo (INTA, 2009).

En la literatura citada hasta este momento, no se encontraron estudios o documentación en formato virtual o física, que indique: (1) cuál variedad de cacao es de mayor producción en Nicaragua; (2) cuánto cacao se produce en cada uno de los departamentos mencionados anteriormente.

En Nicaragua se está desarrollando la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Cacao-cultura Nicaragüense (2017-2021), en el cual se busca el mejoramiento de los procesos de postcosecha y procesamiento de cacao. Por su parte, el INTA desarrolla nuevos métodos y tecnologías para el procesamiento del cacao, contribuyendo así a potenciar el valor agregado de este rubro.

3.2 BENEFICIADO DEL CACAO

Según Johnson, Bonilla, & Aguero (2010), son tres los factores que intervienen de forma directa en la calidad del grano de cacao, a saber: factores genéticos o relacionados a la variedad del cacao; condiciones ambientales donde se cultiva; y finalmente el beneficiado del cacao. Los dos primeros factores no están bajo el control total del productor, pero si el beneficiado ya que es responsabilidad del cacaotero implementar buenas prácticas poscosecha.

De acuerdo con Ayestas et al. (2014), el beneficiado del cacao se compone de tres etapas y seis actividades. La primera etapa esta constituida en dos actividades las cuales son la

cosecha de las mazorcas maduras y la extracción-selección de las semillas. En esta etapa se descartan mazorcas y granos en mal estado que afecten las subsecuentes etapas.

La segunda etapa esta conformada por dos actividades tales como la fermentación y el secado del grano. La calidad del cacao se ve 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 empaque y transporte del cacao a los centros de comercio (Ayestas et al., 2014).

3.3 FERMENTACIÓN DEL CACAO

La fermentación es una de las actividades con más importancia en el beneficiado del cacao. Luego de la primera etapa del beneficiado, los granos se fermentan y sufren transformaciones tanto internas como externas.

Reyes & Capriles de Reyes (2000) indica que la fermentación será eficiente si se garantizan mazorcas en buen estado, separadas según la variedad de cacao y almacenarlas de entre cuatro a cinco días antes de abrirlas. Previo a la fermentación, los cajones deben limpiarse garantizando que no existan restos de otras fermentaciones, hongos e insectos.

Se debe programar la fermentación cuando se cuente con suficiente cantidad de mazorcas, esto con la finalidad de llenar la capacidad del cajon fermentador y así lograr el volumen necesario para alcanzar las temperaturas requeridas; a su vez, la masa fermentativa debe estar bien cubierta con drenajes en los cajones (Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

Durante la fermentación se produce la muerte del embrión, se elimina la pulpa que rodea a los granos y se desarrollan los aromas, sabores, colores y olores característicos del cacao (IPADE, 2010; INTA, 2009). La fermentación se compone de dos fases: una fase anaeróbica o fermentación en ausencia de oxígeno; y una fase aeróbica o fermentación en presencia de oxígeno (IPADE, 2010). Por su parte, Pastorelly (2013) hace referencia a las mismas fases anaeróbicas y aeróbica, pero introduce el término de “fermentación anaeróbica media”.

A continuación, se detalla lo que sucede durante las tres fases de la fermentación:

- a) Primera fase anaeróbica: Durante la fase anaeróbica inicial (comprendida entre el primer a segundo día y dependiendo de la variedad del cacao), la masa fermentativa se transforma anaeróbicamente por acción de distintos géneros de levaduras tales como: *Candida*, *Hanseniospora*, *Saccharomyces*, *Kloeckera*, *Pichia* y *Kluyveromyces*.

Estas levaduras metabolizan los azúcares del mucílago que rodea a los granos de cacao, transformándolos en etanol y dióxido de carbono. En el transcurso de la primera fase, el pH se reduce a valores tales que el número de levaduras disminuye y aumenta el número de bacterias ácido acéticas y ácido lácticas (Pastorelly, 2013).

- b) Fase anaeróbica media: Durante esta fase las bacterias ácido lácticas y ácido acéticas transforman el alcohol en ácido láctico y ácido acético, respectivamente. La temperatura de la masa fermentativa aumenta gradualmente hasta estabilizarse en unos 45°C. Adicionalmente, el aumento del pH y la temperatura provoca la muerte del embrión (IPADE, 2010; Pastorelly, 2013).

Según Valdivia Arrunátegui (2013), en esta fase se liberan enzimas como las proteasas y las polifenoloxidasas. Estas enzimas son vitales para la formación de aminoácidos causantes del cambio de color a marrón en los granos de cacao.

- c) Fase aeróbica: El oxígeno tiene mayor presencia en la masa fermentativa, acelerado por la mezcla y los volteos. En esta fase se oxidan los compuestos polifenólicos obtenidos en la fase previa. Además, la cantidad de humedad se reduce hasta llegar a un punto de inactividad enzimática. Finalmente, el cambio de color en toda la masa fermentativa es bastante notorio (Reyes & Capriles de Reyes, 2000; IPADE, 2010).

En este momento el cacao está listo para el secado. Por su parte, el IPADE (2010) indica que esta fase fermentativa continua durante el secado; y culmina hasta que la humedad sea tan baja de tal manera que no sea posible que se genere ningún proceso bioquímico.

Es sumamente necesario realizar volteos en la masa de los granos para asegurar la aereación cada 48 horas como mínimo y la duración de la fermentación debe ser la suficiente según la variedad del cacao (Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

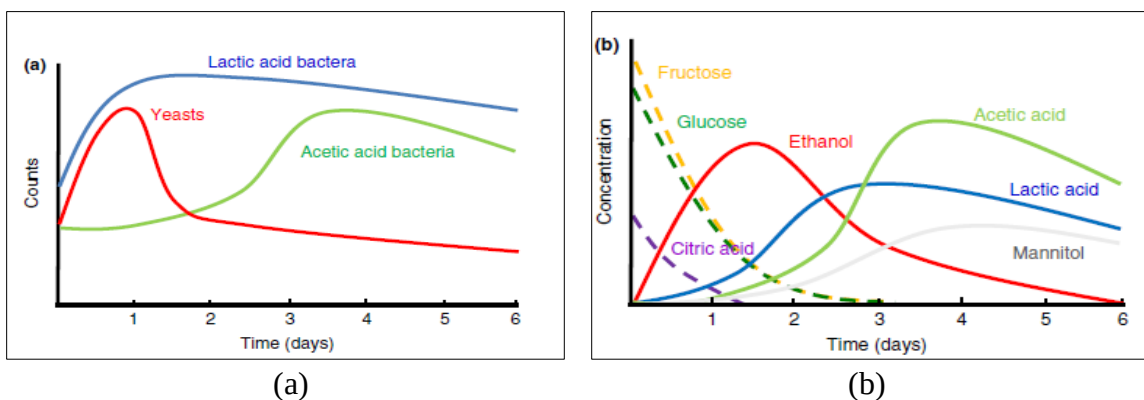


Figura 3.2 (a) Dinámica del conglomerado microbiano; y (b) degradación de sustrato con cinética de producción de metabolito durante el proceso de fermentación espontánea de granos de cacao. Tomado de De Vuyst & Wekx (2015), figura 1.

Por su parte De Vuyst & Wekx (2015) hacen mención del comportamiento microbiológico durante la fermentación del cacao. En dicho comportamiento, se destacan tres tipos de microorganismo, a saber: levaduras, bacterias ácido acéticas y bacterias ácido lácticas. Se puede apreciar en la [Figura 3.2a](#) que en el primer día hay un gran crecimiento de levaduras y bacterias ácido lácticas. Esto coincide con la etapa anaeróbica de la fermentación del cacao.

En el transcurso del segundo día, la cantidad de levaduras disminuye abruptamente. Al mismo tiempo, la cantidad de bacterias ácido lácticas decrece, pero a una tasa menor. Por su parte, la concentración de bacterias ácido acéticas siempre aumenta, alcanzando su valor máximo entre el tercer y cuarto día. Este comportamiento corresponde a la etapa aeróbica de la fermentación, la cual se prolonga hasta el día sexto.

En la [Figura 3.2b](#) se muestran los metabolitos producidos por los microorganismos presentes en la fermentación. La concentración de etanol aumenta durante los primeros dos días de la fermentación; pero luego disminuye gradualmente. Al mismo tiempo aumenta la concentración de los ácidos láctico y acético.

Como se ha mencionado previamente, el tiempo de fermentación depende en gran medida de la variedad de cacao y de las condiciones climáticas. Por ejemplo, en la [Tabla 3.1](#) se muestran los protocolos de fermentación establecidos por entidades venezolanas para tres variedades de cacao.

Tabla 3.1 Protocolos de fermentación para cacao según la variedad (adaptación de Pugh & Vivas, 2016).

Variedad de cacao	Días de fermentación	Frecuencia de volteos una vez iniciada la fermentación
Criollo	Tres a cuatro días	Primer volteo a las 24 horas Segundo volteo a las 48 horas **Inicio de secado a las 72 horas
Trinitario	Cuatro a seis días	Primer volteo a las 24 horas Segundo volteo a las 72 horas Tercer volteo a las 120 horas **Inicio de secado a las 144 horas
Forastero	Siete días	Primer volteo a las 24 horas Segundo volteo a las 72 horas Tercer volteo a las 120 horas **Inicio de secado a las 168 horas
	Ocho días	Primer volteo a las 24 horas Segundo volteo a las 72 horas Tercer volteo a las 120 horas Cuarto volteo a las 168 horas **Inicio de secado a las 192 horas

3.4 SECADO DEL CACAO

El secado es el proceso en el cual se remueve humedad de un material mediante el suministro de energía al sólido provocando que el líquido, que en la mayoría de los casos es agua, se evapore (Treybal, 1980). Un material húmedo puede secarse mediante tres mecanismos de transferencia de calor: radiación, conducción o convección. Sin embargo, el más utilizado es el secado por convección (Nonhebel & Moss, 2002).

Entre los objetivos del secado de un alimento está el prolongar su almacenamiento, facilitar su transporte y evitar la pudrición causada por microorganismos. De esta manera se tiene una materia prima lista para dar inicio a un proceso productivo (Sokhansanj & Jayas, 2007).

3.4.1 HUMEDADES EN EL GRANO DE CACAO

Luego de la etapa fermentativa el cacao tiene un contenido de humedad que puede variar entre un 45 a 60% en base húmeda (bh), de acuerdo a Reyes & Capriles de Reyes (2000); o bien, de 50 a 55% bh según IPADE (2017). Por su parte, IPADE (2010) reporta valores del 60% bh, e incluso tan altas como el 65% bh, según Pérez & Contreras (2017).

Para el almacenamiento seguro del cacao, esta humedad debe ser reducida a valores a los cuales no se desarrollen mohos o bacterias; y además se desactiven enzimas presentes en el grano (End & Dand, 2015; Pérez & Contreras, 2017). La humedad requerida depende de la exigencia del comprador; el cual la establece de acuerdo a su proceso productivo, condiciones climáticas del almacenamiento, entre otras. Por ejemplo, en Nicaragua, la empresa Ritter Sport solicita una humedad del 6% bh (IPADE, 2010; End & Dand, 2015; INTA, 2009).

En su mayoría, la literatura coincide en que la humedad no debe superar el 8% bh para evitar el desarrollo de mohos, la acidificación de los granos y la formación de Ocratoxina A (OTA). En contra parte, la humedad del grano no debe estar por debajo del 6% bh ya que los granos se vuelven muy quebradizos (End & Dand, 2015; Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya, 2017; IPADE, 2010; Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

3.4.2 MÉTODOS DE SECADO PARA EL CACAO

Los métodos de secado del cacao se dividen en secado natural y en secado artificial, conocido también como secado asistido. El secado natural (en ocasiones llamado tradicional) consiste en secar el cacao usando el sol como única fuente de energía. Por su parte, en el secado artificial se utilizan fuentes de energía diferentes al sol para calentar el aire (Pérez & Contreras, 2017; Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

Entre los sistemas usados para el secado natural en latinoamérica, está el secado en patio (ya sea de concreto o de tierra sobre lonas o plástico y en cualquier variante con o sin techo); secado en bandejas, generalmente de marco de madera, con fondo de madera (marquesina) o de malla metálica. Las bandejas pueden estar sobre mesas o sobre rieles, a la intemperie o bajo techo. Se utiliza techo de plástico de invernadero, o láminas corrugadas

transparentes (ProDeSoC, 2006; IPADE, 2010; IPADE, 2017; INTA, 2009; Pérez & Contreras, 2017; Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya, 2017; Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

Por su parte, para el secado artificial se usan secadores tipo Samoa (el más común en Nicaragua), secadores rotativos, secadores de tambor rotatorio, entre otros; los cuales usan como fuente de energía biomasa, combustibles fósiles o energía eléctrica. Al realizar el secado del cacao de manera artificial, se debe evitar la contaminación del grano con los gases de combustión (End & Dand, 2015; Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya, 2017; Reyes & Capriles de Reyes, 2000; IPADE, 2010; ProDeSoC, 2006).

3.4.3 VELOCIDAD DE SECADO DEL CACAO

La velocidad de secado del cacao tiene gran importancia en cuanto a la calidad del grano. Durante el secado continúan los cambios bioquímicos responsables del desarrollo del sabor y aroma. Por tal motivo, el secado debe realizarse lentamente pero no por tiempos prolongados puesto que provocaría la aparición de moho. Por su parte, si el secado inicialmente se realiza muy rápido, resultaría en granos ácidos debido a que los ácidos producidos en la fermentación quedan encapsulados y además se obtendrían almendras con apariencia aplastada (Reyes & Capriles de Reyes, 2000; Pérez & Contreras, 2017; Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya, 2017; End & Dand, 2015; IPADE, 2017; PROCOMER, s.f.).

Para evitar estos problemas, el secado se realiza en dos etapas. La primera etapa, conocida como presecado o secado lento, se caracteriza por realizarse a bajas velocidades y de forma natural. Por su parte, la segunda etapa, conocida como secado rápido, se realiza a mayores velocidades hasta disminuir la humedad del grano a los valores requeridos; y puede llevarse a cabo tanto por secado natural como artificial (PROCOMER, s.f; Pérez & Contreras, 2017; IPADE, 2017; Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya, 2017).

3.4.4 TIEMPO DE SECADO PARA EL CACAO

La mayor información disponible en la literatura es para el secado natural. A continuación se dará una breve descripción de las directrices sobre el secado artificial y posteriormente sobre el secado natural.

Secado Artificial

El tiempo de secado por método artificial obviamente es menor en comparación con el método natural. Por ejemplo, IPADE (2017) indica entre 20 y 36 horas para los secadores tipo Samoa. Por su parte, PROCOMER (s.f.), para el mismo secador, detalla tres fases de secado: acondicionamiento, secado inicial y secado final.

La primera fase de secado se realiza por secado natural, con exposición del grano de 12 a 20 horas y volteos cada 20 minutos. En la segunda fase, el grano se coloca sobre el secador artificial y se hace pasar aire sin calentar a velocidades entre 1 y 2 m/s, durante 8 horas y

volteos cada 30 minutos. Finalmente, la tercera fase toma de 4 a 5 días, con 6 a 8 horas de secado y volteos cada 30 minutos. La temperatura del aire se incrementa gradualmente desde el primer día a 35-40°C hasta 50-55°C para el tercer día y los subsiguientes. Nunca se debe sobrepasar los 60°C ya que el grano se quiebra y por ende se deteriora fácilmente. Se opera con espesores de lecho de cacao de entre 20 y 30 cm (PROCOMER, s.f.).

Sin embargo, otros autores indican que el secado artificial podría realizarse a temperaturas superiores a los 60°C. Por ejemplo, Arvelo, González, Maroto, Delgado, & Montoya (2017), señalan que la temperatura ideal para el secado es de 64 a 70°C. Además recomiendan no superar los 80°C para evitar la retención de acidez. Por su parte, Wood & Lass (1985), establecen como límite la temperatura del grano, la cual no debe superar los 65°C.

Secado Natural

En el caso de secado natural, se encuentra coincidencia en que la etapa de presecado debe completarse en uno o máximo tres días para asegurar la remoción de los ácidos (IPADE, 2010; PROCOMER, s.f). En cambio, para la etapa de secado rápido hay amplias diferencias en los días sugeridos. Inclusive se detallan: horas de exposición solar para cada día de secado; intervalos para el mezclado de los granos (volteo); así como espesores de lecho del grano, en dependencia del sistema de secado empleado.

El volteo tiene como objetivo asegurar que el secado sea homogéneo. De esta manera se evita que los granos que están en la capa inferior permanezcan húmedos y que los granos que están en la parte superior tengan un secado excesivo.

Al realizar el secado de forma natural, la temperatura media máxima alcanzada es de aproximadamente de 55-60°C (Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

Los días totales de secado pueden variar en dependencia de las condiciones climáticas; las cuales a su vez dependen del microclima de la zona y la estación climática. Por ejemplo, el INTA (2009) reporta entre 6 a 8 días de secado sin especificar mayores detalles. Por su parte, Reyes & Capriles de Reyes (2000) sugieren de 6 a 8 días para el secado en patios. En cambio, IPADE (2010) señala que al secar en marquesinas se requieren 10 días de secado en verano y hasta 15 días en invierno.

Respecto a las horas de exposición solar al secar en marquesinas, IPADE (2017) orienta para el verano, presecar por dos días exponiendo el cacao durante 3 horas, iniciando temprano en la mañana, con espesor de lecho de 3-5 cm. Posteriormente la exposición se incrementa en una hora cada día hasta alcanzar el máximo de horas disponibles de sol.

Durante invierno, se expone el cacao por más tiempo y el espesor de la capa del grano debe ser más delgado. Para los primeros tres días el volteo se realiza cada hora. A partir del cuarto día se volteo el grano cada media hora y el espesor del lecho utilizado depende de las condiciones climáticas.

En cambio, Pugh & Vivas (2016) siempre para marquesinas, restringe el espesor del lecho a un máximo de 3 cm e inicia el tiempo de exposición con 2 horas para el primer día, partiendo a las 8:30 am. De igual manera de IPADE (2017) incrementa la exposición una hora por día, pero solamente hasta el cuarto día. A partir del quinto día aprovecha el máximo de horas disponibles de sol. Además, el volteo se realiza siempre cada hora.

Por su parte, Reyes & Capriles de Reyes (2000) indica para el secado en patios de cemento, para el primer día exponer el cacao durante 4 horas usando un espesor de grano de 8 cm hasta 10 cm; para el segundo día 5-6 horas, con 5-6 cm de espesor; y del tercer día en adelante aprovechar el máximo de horas disponibles de sol.

3.4.5 CURVAS RELACIONADAS CON EL SECADO DEL CACAO

Curvas de Cinética de Secado

MacManus Chinenye, Ogunlowo, & Olukunle (2010) investigaron la cinética de secado del cacao a escala de laboratorio, utilizando un secador discontinuo con mecanismo de mezclado con un lecho de 5 cm de espesor de grano, velocidad constante del aire desecante de 2.51 m/s y a tres temperaturas.

El contenido de humedad inicial del grano era de 36.1% bh o bien 0.57 en base seca (bs) y fue secado hasta un 5.7% bh (0.06 bs). De acuerdo a sus resultados, solamente se observó un período de secado decreciente ([Figura 3.3](#)).

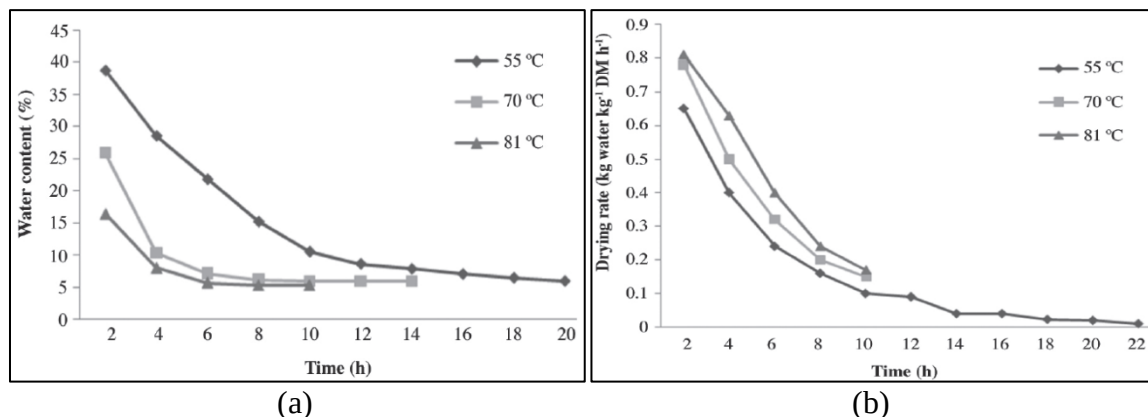


Figura 3.3 (a) Efecto de la temperatura del aire de secado sobre el contenido de humedad (en base seca por cien); y (b) sobre la velocidad de secado del cacao. Tomado de MacManus Chinenye, Ogunlowo, & Olukunle (2010), figura 3 y figura 4.

Por su parte, Tinoco & Ospina (2010), siempre a escala de laboratorio, secaron cacao a 60°C, en un horno de gas con bandejas perforadas sin hacer fluir aire. El contenido de humedad inicial del grano era de 67.5% bh (2.08 bs) y lo secaron hasta un 9.3% bh (o bien 0.10 bs). Según estos autores, obtuvieron un período de velocidad constante pero no indican cual es el valor de humedad crítica ([Figura 3.4](#)).

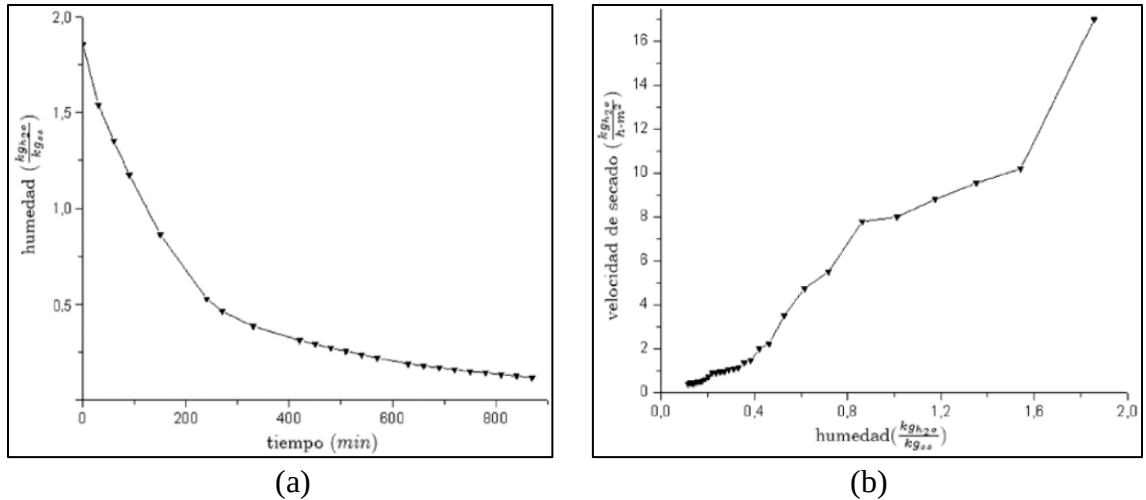


Figura 3.4 (a) Humedad del cacao; y (b) velocidad de secado. Tomado de Tinoco & Ospina (2010), figura 6 y figura 7.

Sin embargo, Baryeh (1985) afirma que a una humedad relativa del aire del 70% y 80°C, partiendo de una humedad inicial cercana al 56% bh (1.27 bs), hay un período de velocidad constante con una humedad crítica del 50% bh (1.00 bs) (Figura 3.5). En cambio, Shelton (1967) citado por Caballero (2015), señala para un rango de 65 a 80°C que la humedad crítica se encuentra entre 30-31% bh (0.42-0.44 bs).

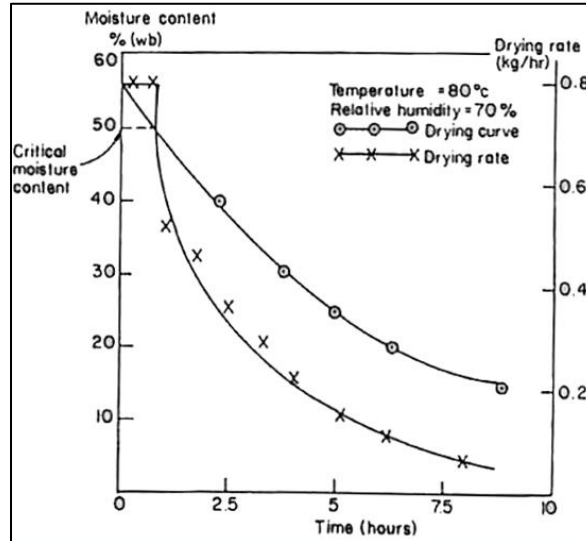


Figura 3.5 Curva de secado y velocidad de secado. Tomado de Baryeh (1985), figura 4.

Adicionalmente, Herman et al. (2018) estudiaron la influencia de la temperatura y la velocidad del aire en el secado de cacao, partiendo de humedades del grano de entre 43 y 48% bh (0.76 y 0.92 bs). De acuerdo a sus resultados experimentales y un modelo de secado desarrollado, concluyen que el secado inicia con un corto periodo de velocidad constante (Figura 3.6). Por tanto, cuando la humedad es mayor que 37.5% bh (0.60 bs), el

secado es influenciado tanto por la temperatura como la velocidad del aire. Mientras que por debajo de este valor, la velocidad de secado depende solo de la temperatura y del contenido de humedad del grano.

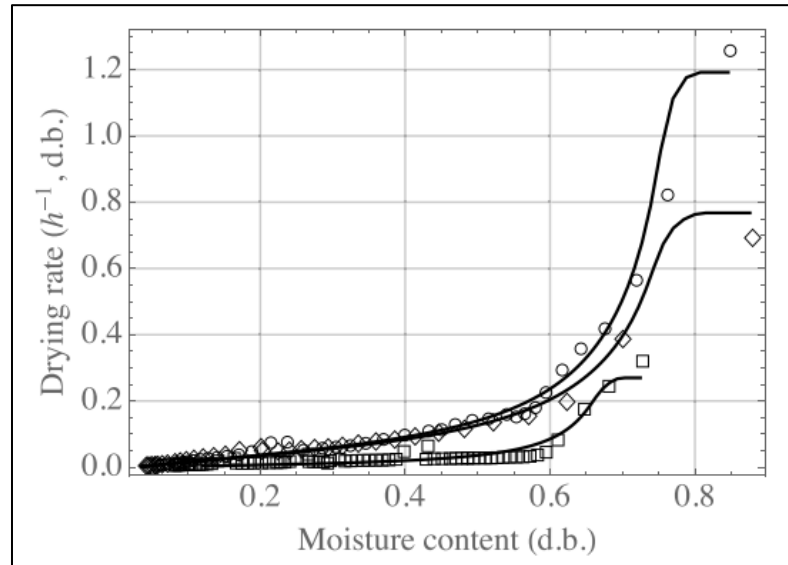


Figura 3.6 Velocidad de secado con velocidad del aire de 0.6 m/s (rombos) y 1 m/s (círculos) a 60°C; velocidad del aire de 0.6 m/s a 30°C (cuadrados). Tomado de Herman et al. (2018), figura 11.

Por su parte, Sandy et al. (2015) secaron cacao recién fermentado con humedad inicial 60% bh (1.5 bs), utilizando un prototipo de secador híbrido directo con ambiente a $38 \pm 8^\circ\text{C}$ y humedad relativa 40%. El trabajo consistió en comparar cuatro tratamientos de secado denotados por T1, T2, T3 y T4. En los tratamientos T1, T2 y T3, realizaron el secado en el prototipo operando las 24 horas del día.

En el tratamiento T1, el cacao no fue presecado; en el T2 presecaron durante 1 día; en el T3 presecaron por 2 días y finalmente, el tratamiento T4 consistió en un secado tradicional en esteras con 2 días de presecado. Las humedades finales alcanzadas en los cuatro tratamientos fueron de entre 7.36-7.5% bh (0.079-0.081 bs).

Según estos autores, para todos los tratamientos, en los dos primeros días (Figura 3.7) se observó un período de velocidad constante, el cual finalizó a una humedad crítica de secado del 25% bh (0.33 bs). La humedad final requerida se alcanzó en cuatro días en los tres tratamientos en los cuales se utilizó el secador prototipo. En cambio, por secado tradicional se requirieron dos días adicionales debido a que durante el período de secado decreciente y únicamente por la noche, los granos absorbían humedad.

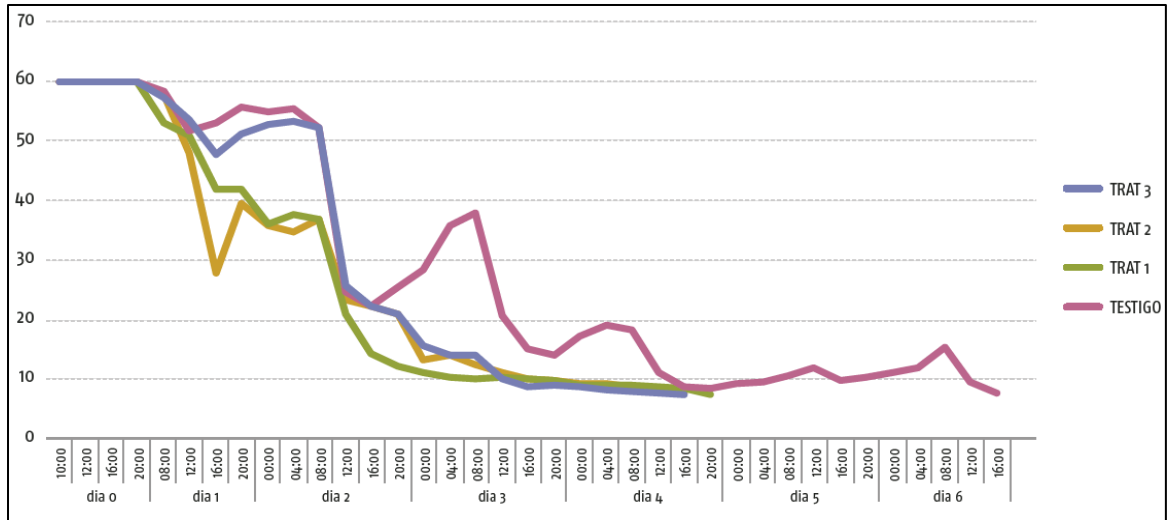


Figura 3.7 Humedad (%) de cacao durante el secado dentro y fuera del prototipo. Tomado de Sandy et al. (2015), figura 3.

Curvas de Equilibrio del Secado

La humedad mínima en el equilibrio que se puede alcanzar en el proceso de secado depende de las condiciones del aire desecante. Dicha humedad se puede estimar por medio de las isotermas de desorción, las cuales para granos de cacao fermentados han sido determinadas por autores tales como Oliveira et al. (2011), Akmel et al. (2015) y Koua, Koffi, & Gbaha (2016).

Materiales higroscópicos, como el cacao, tienden a absorber humedad en dependencia de las condiciones del aire al que está expuesto. La cantidad de agua absorbida en el equilibrio se puede estimar por medio de las isotermas de adsorción. Estas curvas han sido determinadas para granos de cacao fermentado por Kakou et al. (2015) y para granos de cacao secos y tostados por Collazos-Escobar et al. (2020).

Las isotermas de desorción y adsorción del agua, son gráficas de contenido de humedad del material como función de la actividad del agua. En el equilibrio, la actividad del agua, a_w , esta relacionada con la humedad relativa, HR , de la atmósfera circundante por medio de la ecuación (Iglesias & Chirife, 1982):

$$a_w = \frac{HR (\%)}{100} \quad (3.1)$$

Akmel et al. (2015), determinó las isotermas de desorción de granos de cacao fermentados para tres diferentes temperaturas (Figura 3.8a). Haciendo uso de dicha gráfica, partiendo de una temperatura de 30°C y humedad relativa del 77%, la humedad máxima que se puede alcanzar durante el secado al sol es aproximadamente de 16% bh (0.19 bs); mientras, si el aire se calienta a 60°C la humedad relativa se reduce a 16.4%, la humedad máxima alcanzada sería menor de 4.8% bh (0.05 bs).

Por su parte, empleando la gráfica elaborada por Kakou et al. (2015), [Figura 3.8b](#), el cacao almacenado a temperaturas cercanas a los 20°C y humedades relativas alrededor del 90%, los granos podrían alcanzar una humedad en el equilibrio cercana a 10% bh (0.11 bs).

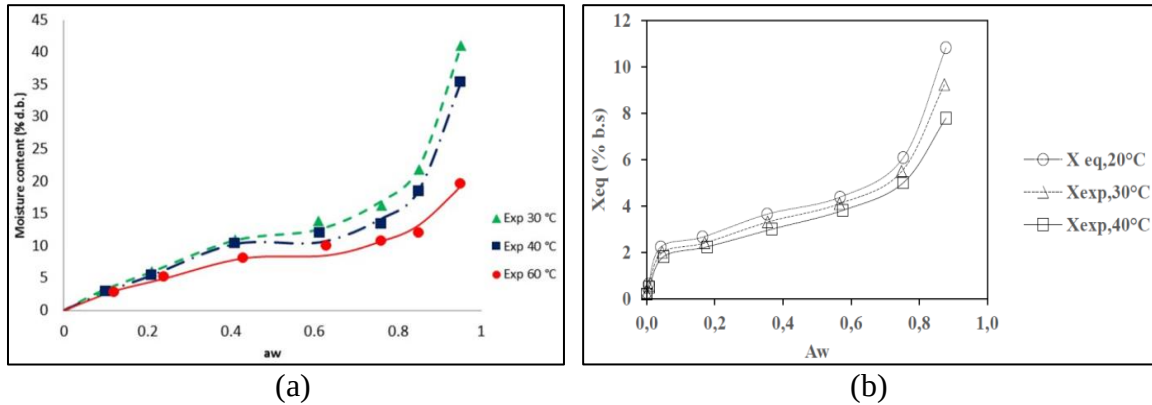


Figura 3.8 (a) Isotermas de desorción de los granos de cacao fermentados, tomado de Akmel et al. (2015), figura 1; (b) isotermas experimentales de adsorción, tomado de Kakou et al. (2015), figura 2.

3.5 SECADORES SOLARES

Los secadores solares funcionan según el principio de efecto invernadero (Patil & Gawande, 2016). En el interior del mismo, la atmósfera debe tener una humedad relativa baja para que el agua contenida en el producto migre a la superficie del mismo desde donde es removida por una corriente de aire ya sea en forma natural o forzada. El aire debe ser removido continuamente para permitir que el proceso de secado sea efectivo (Condori, 2016).

A diferencia de los secadores convencionales, los cuales se caracterizan por mantener las condiciones de trabajo constantes durante el proceso de secado, en los secadores solares el proceso es más complejo debido a la variabilidad de las condiciones meteorológicas (Condori, 2016).

3.5.1 TIPOS DE SECADORES SOLARES

Los secadores solares pueden clasificarse en función de la temperatura de operación, la fuente de energía y el movimiento del aire, [Tabla 3.2](#) (Patil & Gawande, 2016; Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010).

Con respecto a la temperatura de operación, la mayoría de los secadores diseñados para operar a baja temperatura son sistemas basados en energía solar (Koyuncu, 2006). Adicionalmente, Ekechukwu & Norton (1999) indican que son muy pocos los diseños de secadores a alta temperatura que emplean energía solar para el calentamiento.

En cuanto a la forma con la que se aprovecha la radiación solar, los secadores directos son más sencillos de construir pero el secado es lento. Por su parte, los secadores indirectos son utilizados cuando el material a secar pueda sufrir daño por exposición directa al sol. En estos equipos se puede colocar el material en capas de mayor espesor por lo cual requieren menor área de secado (Norton, 2017; Banout, 2017).

Finalmente, con respecto al movimiento del aire, los secadores activos son más efectivos en términos de la rapidez y de la calidad de secado (Patil & Gawande, 2016). Adicionalmente, Banout (2017) afirma que los secadores activos son recomendados para secar productos con alto contenido de humedad y a gran escala.

Tabla 3.2 Tipos de secadores solares. Elaboración propia, basada en clasificación de Patil & Gawande (2016); Koyuncu (2006); Norton (2017); Banout (2017).

Clasificación según:	Secadores solares:	Características:
Temperatura de operación	Baja	Elevación de 10°C a 35°C por encima de la temperatura ambiente.
	Alta	Mayores pérdidas por transferencia de calor con los alrededores.
Forma de aprovechar la radiación solar	Directos	La radiación solar incide directamente sobre el material a secar.
	Indirectos	La radiación solar es utilizada para calentar aire en una sección previa conocida como colector solar, y luego fluye sobre o a través del lecho del material a secar ubicado en una cabina que lo protege de la radiación solar.
	Mixtos	El material a secar es expuesto directamente a la radiación solar y a un flujo de aire previamente calentado en un colector solar.
	Híbridos	La energía térmica es obtenida de la radiación solar y de fuentes auxiliares tales como resistencias eléctricas o quemadores de combustibles fósiles o biomasa.
Movimiento del aire	Pasivos	El movimiento del aire en el secador es debido a convección natural.
	Activos	Se emplea un medio mecánico para hacer circular el aire en el secador.

3.5.2 SECADOR DE BURBUJA SOLAR

Se conoce como secador de burbuja solar a un equipo desarrollado por investigadores del Instituto Internacional de Investigación del Arroz (Filipinas), la Universidad de Hohenheim (Alemania) y GrainPro, Inc. (Filipinas). Actualmente, el secador de burbuja solar es comercializado por la empresa GrainPro® (GrainPro® Bubble Dryer™).

Este es un secador tipo túnel semicilíndrico con ventiladores, los cuales funcionan ya sea con energía fotovoltaica (Figura 3.9) o corriente alterna doméstica. La parte superior es de polietileno transparente, resistente a la radiación UV y la parte inferior es de PVC negro, ambos unidos por una cremallera. Este secador puede ser utilizado para una amplia variedad de granos, es portable y fácil de transportar (GrainPro, 2021).

De acuerdo a la clasificación discutida en el [acápito 3.5.1](#), este secador opera a baja temperatura, es directo y activo. El desarrollo de este equipo se discute en el trabajo de Salvatierra-Rojas, Nagle, Gummert, de Bruin, & Muller (2017). En este mismo trabajo se realizó la evaluación del equipo secando arroz en granza. Los resultados de esta evaluación se discuten en la [sección 3.6](#).



Figura 3.9 Modelo de Secador de Burbuja Solar con fuente de energía fotovoltaica. Tomado de GrainPro (2021).

A su vez, el equipo descrito por Salvatierra-Rojas et al. (2017) se basó, entre otros, en el trabajo desarrollado por Lutz, Muhlbauer, Muller, & Reisinger (1987). Estos últimos autores desarrollaron dos secadores solares de túnel con colector integrado: uno con colector frontal para secar pequeñas cantidades de producto (Figura 3.10) y otro con colector lateral para procesar grandes cantidades (Figura 3.11). Ambos equipos operan a baja temperatura, son mixtos y activos.

Los dos secadores desarrollados por Lutz et al. (1987), tienen un marco rígido de madera. La parte superior es una película de polietileno transparente con burbujas de aire altamente resistentes a la radiación UV. En cuanto a la cámara de secado, el área de secado es de una red de plástico negro de polietileno. En cambio, el fondo del colector esta formado por

polietileno negro sobre láminas de espuma de poliestireno. Ambos equipos fueron evaluados secando uvas (Lutz & Muhlbauer, 1986; Lutz et al. 1987).

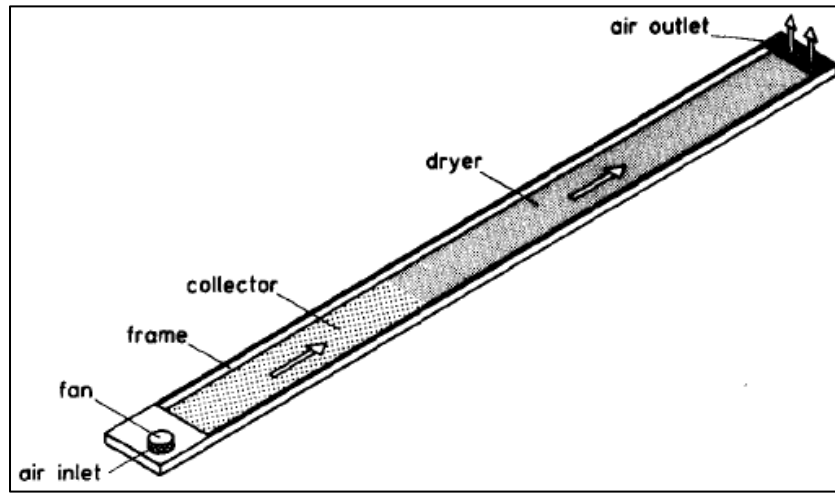


Figura 3.10 Secador solar de túnel para secar pequeñas cantidades. Tomado de Lutz, et al. (1987), figura 1.

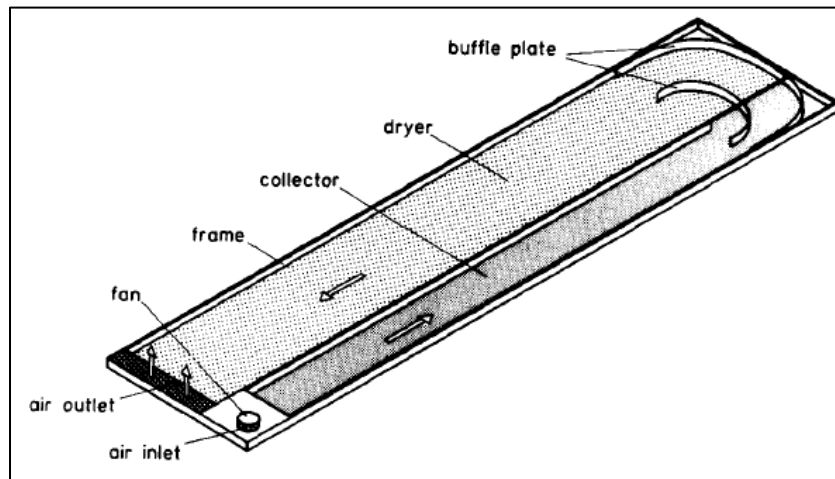


Figura 3.11 Secador solar de túnel para secar grandes cantidades. Tomado de Lutz, et al. (1987), figura 2.

3.6 EVALUACIÓN DE SECADORES SOLARES

De acuerdo a Leon, Kumar, & Bhattacharya (2002), existen diferentes metodologías para la evaluación de secadores solares. Los parámetros generalmente considerados en esas metodologías se pueden categorizar en: características físicas del secador, desempeño térmico, calidad del producto secado y su análisis económico.

3.6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Esto se relaciona con el tipo de secador solar, peso, geometría, configuración, dimensiones, área de secado, materiales de construcción, capacidad y densidad de carga, área de bandeja y su cantidad, así como la facilidad de carga y descarga del material a secar.

3.6.2 DESEMPEÑO TÉRMICO

En el desempeño térmico de un secador se involucran diversos parámetros, tales como tiempo y velocidad de secado; temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de secado; y energía solar incidente; con los cuales se puede determinar la eficiencia energética del secador (Leon et al., 2002).

El tiempo de secado es todo el tiempo que ha transcurrido desde la carga del material fresco hasta alcanzar la humedad mínima requerida, incluyendo los períodos en los cuales no se cuenta con radiación solar. Usualmente este tiempo es dado en horas o días (Leon et al., 2002).

La velocidad de secado se obtiene representando gráficamente el contenido de humedad del producto respecto al tiempo (Figura 3.12). Cuando el secador es grande, se recomienda dar seguimiento a la velocidad de secado en diferentes puntos del mismo. (Leon et al., 2002).

En el caso de la Figura 3.12, construida por López & Chávez (2018), secando cacao en un secador de baja temperatura, directo y activo, en el eje de abscisas el tiempo corresponde a horas acumuladas de secado. En cambio, en la Figura 3.7 (elaborada por Sandy, Reza, Espinoza, & Arellano (2015) secando cacao en un secador de baja temperatura, híbrido directo y activo), en dicho eje el tiempo representa los días continuos de secado con las horas locales.

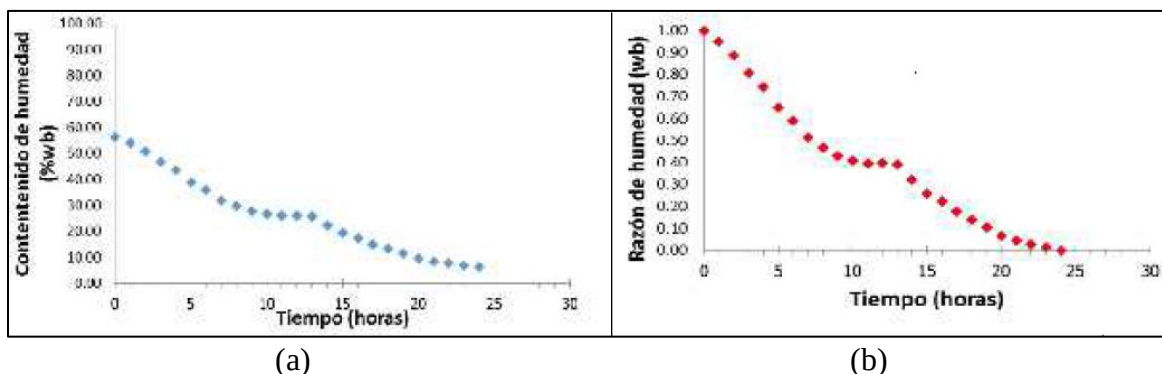


Figura 3.12 Gráfica de velocidad de secado: (a) Contenido de humedad del grano de cacao en base húmeda respecto al tiempo; y (b) razón de pérdida de humedad del grano (humedad/humedad inicial). Tomado de López & Chávez (2018), figura 7.

En cuanto a la temperatura y humedad relativa del aire, autores tales como Porras (2013), Valencia (2014), Mealla-Sánchez & Morales-Olaciregui (2018), Siguencia (2013) y López & Chávez (2018), muestran gráficas por separado de temperatura y humedad relativa del aire respecto al tiempo tales como las [Figura 3.13](#) y [3.14](#). En cambio, Ludeña (1990) y Badgujar (2012), entre otros, muestran únicamente las gráficas de temperatura respecto al tiempo.



Figura 3.13 Comparación de la temperatura del aire dentro y fuera del secador como función de la hora local. Tomado de López & Chávez (2018), figura 3.

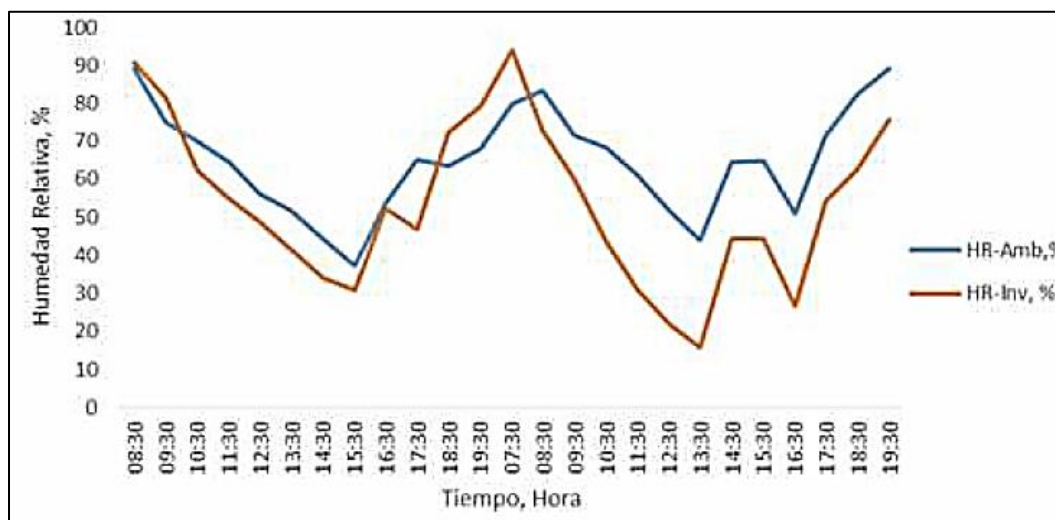


Figura 3.14 Comparación de la humedad relativa del aire dentro y fuera del secador como función de la hora local. Tomado de López & Chávez (2018), figura 5.

Por su parte, Sandy, Reza, Espinoza, & Arellano (2015), los cuales emplearon un secador híbrido directo para secar cacao, muestran en un solo gráfico tanto la humedad del grano como las propiedades del aire en función de la hora local (Figura 3.15).

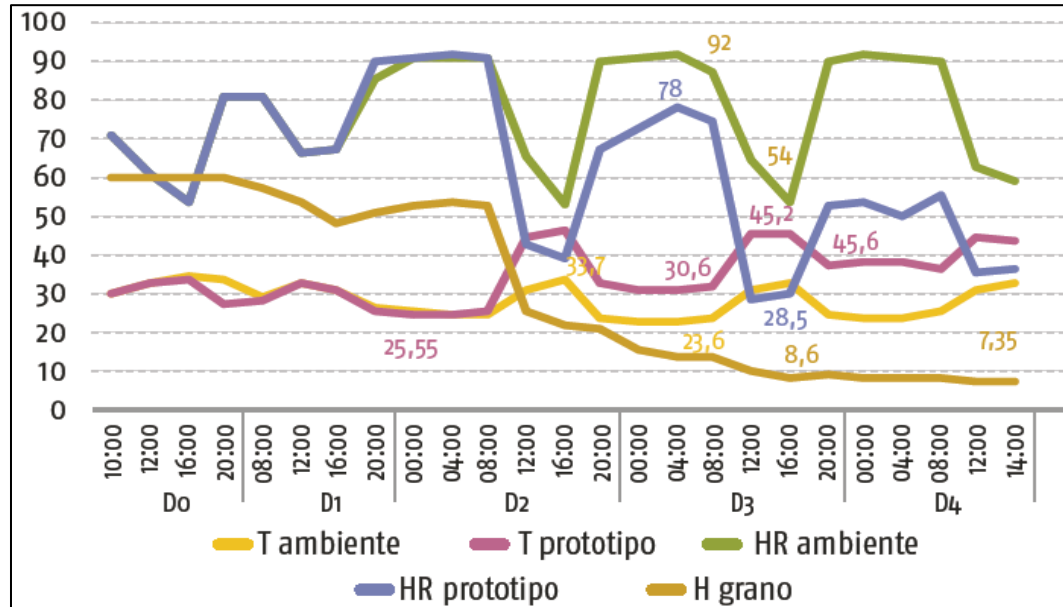


Figura 3.15 Temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del prototipo y humedad del grano respecto hora local y días de secado. Tomado de Sandy, Reza, Espinoza, & Arellano (2015), figura 2.

También se utilizan gráficas de las propiedades del aire como función de la longitud del secador, tales como las presentadas por Lutz K., Muhlbauer, Muller, & Reisinger (1987), Figura 3.16, quienes procesaron uvas en un secador solar de túnel (acápite 3.5.2).

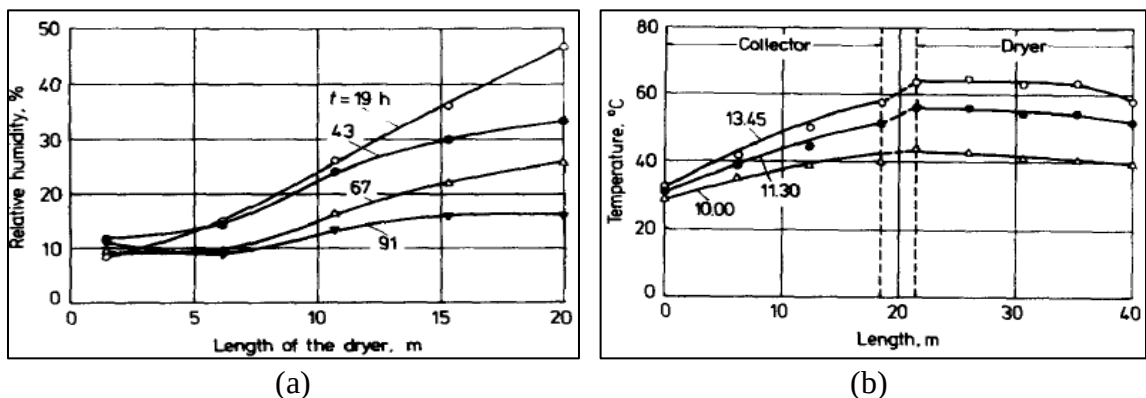


Figura 3.16 (a) Humedad relativa y (b) temperatura del aire a lo largo del secador. Tomado de Lutz K., Muhlbauer, Muller, & Reisinger (1987), figura 8 y 9.

Adicionalmente, Salvatierra-Rojas, Nagle, Gummert, de Bruin, & Muller (2017), presentan gráficos tridimensionales de la temperatura del aire como función tanto de la longitud del

secador como de la hora local (Figura 3.17), para el secado de arroz en granza en un secador de burbuja solar (acápito 3.5.2).

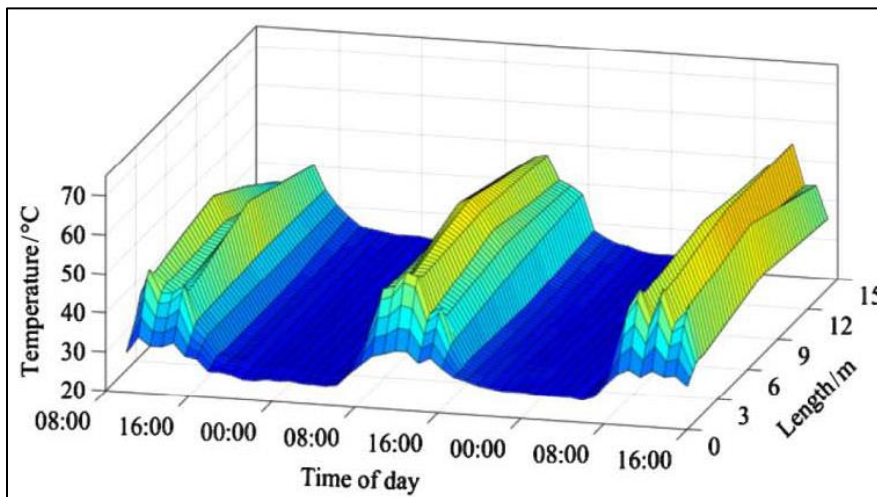


Figura 3.17 Perfil de temperatura del aire respecto a la longitud del secador y el tiempo. Tomado de Salvatierra-Rojas, Nagle, Gummert, de Bruin, & Muller (2017), figura 8.

En cuanto a la velocidad del aire de secado, en la literatura consultada no se han encontrado gráficas en las que se representen velocidades del aire. Los trabajos realizados en la literatura citada previamente, operan a velocidad constante del aire con un valor preestablecido.

Desde el punto de vista teórico, a bajas velocidades del aire la remoción de humedad es lenta y se alcanzan altas temperaturas en el secador, aumentando así las pérdidas de calor. Al incrementar la velocidad del aire, las pérdidas de calor se reducen debido a que se alcanzan menores temperaturas. Sin embargo, la eficiencia del secado se ve afectada ya que el aire podría no tener el tiempo de contacto suficiente con el alimento para incrementar su contenido de humedad. Las recomendaciones generales indican secar con altas velocidades del aire en el período de velocidad constante y trabajar a velocidades bajas durante el período de velocidad decreciente. (Leon et al., 2002; Wood & Lass, 1985).

De acuerdo a Leon et al. (2002), la velocidad óptima del aire para secadores solares es alrededor de 0.75 m³/min por metro cuadrado de área de bandeja. Por su parte, Shelton (1967) indica, para el período de velocidad constante, que los parámetros más económicos para secar cacao son 25 cm de espesor de lecho a un flujo de aire bajo de 0.05 m/s y temperatura moderada de 60-65°C. En cambio, para el período de velocidad decreciente, Wood (1961) reporta un ahorro del 10% en el consumo de combustible al reducir la velocidad del aire de 0.06 a 0.04 m/s. Aunque los datos anteriores sirven como guía, las condiciones más económicas para cada secador en particular deben ser determinadas experimentalmente (Wood & Lass, 1985).

En lo que respecta a la energía solar incidente, la mayoría de los autores construyen gráficos similares a la Figura 3.18, tanto de la irradiancia como temperatura en función del tiempo

(López E. C., 2011; Badgujar, 2012; Porras, 2013; Valencia, 2014; Mealla-Sánchez & Morales-Olaciregui, 2018;).

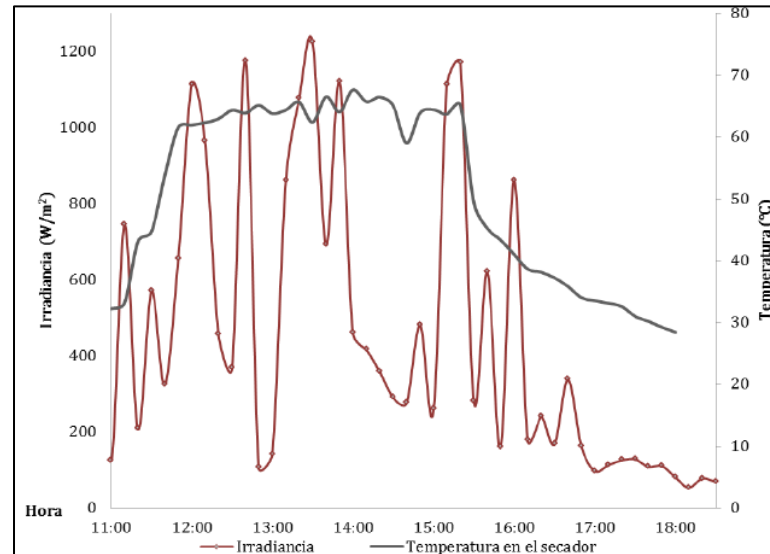


Figura 3.18 Irradiancia y temperatura en el secador como función del tiempo. Tomado de Valencia (2014), figura 32.

Otros autores presentan gráficos más elaborados (Figura 3.19) en los cuales combinan irradiancia, temperatura y diferencia de temperatura entre el secador y el exterior como función del tiempo (Salvatierra-Rojas, Nagle, Gummert, de Bruin, & Muller, 2017; Flores, 2018).

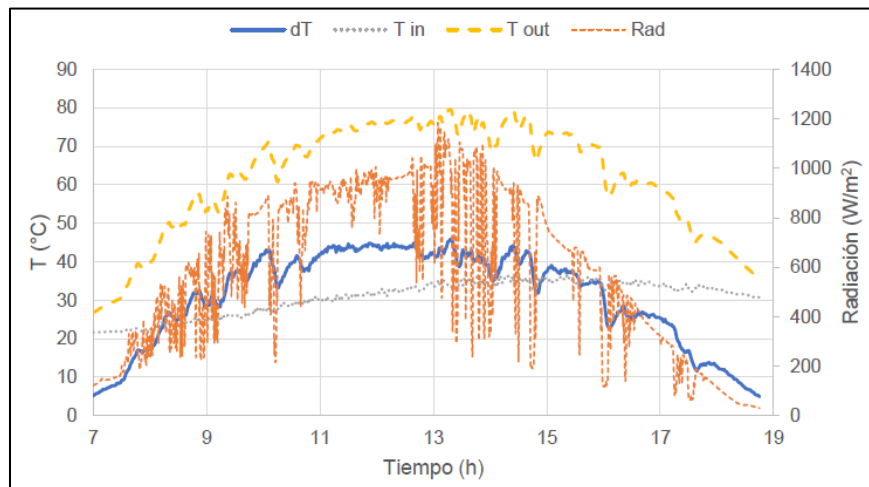


Figura 3.19 Irradiancia, temperatura y diferencia de temperaturas como función del tiempo. Tomado de Flores (2018), figura 23.

3.6.3 EFICIENCIA DE SECADORES SOLARES

El desempeño de un secador y de un proceso de secado pueden ser caracterizados por varios indicadores, tales como: eficiencia energética, eficiencia térmica, eficiencia evaporativa, consumo específico de energía, consumo de vapor, eficiencia de secado, tasa específica de secado, tasa de evaporación volumétrica, pérdidas de calor superficial, entre otros. Sin embargo, de todos estos índices la eficiencia energética es la más citada en las especificaciones técnicas (Vijayan, Arjunan, & Kumar, 2017; Kudra, 2004).

La eficiencia energética de cualquier tipo de secador, η , es la razón entre la energía utilizada para evaporar la humedad del material a su temperatura de alimentación, E_{ev} , y la energía total suministrada al secador, E_T , (McCabeSmith, & Harriot, 2007; Vijayan, et. al, 2017; Kudra, 2004):

$$\eta = \frac{E_{ev}}{E_T} \quad (3.2)$$

Esta definición asume un proceso continuo en el cual todos los parámetros de operación permanecen constantes, como es el caso de período de velocidad constante de secado; por lo cual E_{ev} comunmente se calcula por medio del agua evaporada, m_w , y su calor latente de vaporización, λ_v , a la temperatura del material, por medio de la expresión (Dutta & Kumar, 2017; Kudra, 2009):

$$E_{ev} = m_w \lambda_v \quad (3.3)$$

Sin embargo, la mayoría de los materiales se secan en el período de velocidad decreciente; por lo cual, la energía es usada para remover el agua enlazada capilarmente; calentar el material húmedo conforme cambia su temperatura durante el curso del secado; sobrecalentar localmente el vapor; y recalentar las zonas secas del sólido (Kudra , 2009).

Esto implica que aún alimentando aire a temperatura constante, su temperatura y humedad a la salida varían al avanzar el secado. Por tanto, realmente se obtiene una eficiencia energética promedio con respecto a la longitud del secador continuo a partir de datos de entrada y salida; o bien, un promedio con respecto al tiempo para secador discontinuo a partir de datos de inicio y final del proceso de secado (Kudra, 2009).

Por su parte, la energía total suministrada (E_T) depende del tipo de secador (Tabla 3.2). Por ejemplo, para secadores solares, en el caso de secadores mixtos se toma en cuenta tanto el área del colector solar, A_c , como el área de lecho, A_s , a través de la cual incide la irradiancia solar, G_T . Para secadores por convección forzada se debe considerar la energía consumida por el ventilador, E_f . Así mismo, en los secadores híbridos se añade la energía suministrada por fuentes auxiliares, E_a , (Leon et al., 2002).

$$E_T = G_T(A_c + A_s) + E_f + E_a \quad (3.4)$$

La eficiencia energética promedio es útil cuando se comparan distintos secadores para el mismo producto o diferentes productos secados en el mismo secador (Kudra, 2009). Los trabajos consultados en los que se ha secado cacao, reportan algunos parámetros de los ya discutidos en el [acápite 3.6.2](#), pero ninguno considera dentro de sus objetivos la determinación de la eficiencia energética del secador. Por su parte, para el Secador de Burbuja Solar ([acápite 3.5.2](#)), se ha determinado su eficiencia energética al secar arroz en granza.

Por ejemplo, Aktar, Alam, Alam, Saha, & Roy (2022) al secar tres muestras de arroz en granza, lograron reducir la humedad del grano desde un valor promedio de 20.1% bh (0.25 bs) hasta 14.5% bh (0.17 bs); en 16-18 horas acumuladas, distribuidas en 3-5 días. Señalan que estos tiempos son similares a los requeridos por secado tradicional. Además, indican que la temperatura del aire y la velocidad de remoción de la humedad no variaron apreciablemente a lo largo del secador. La eficiencia energética reportada es de 12.3%; sin embargo, el consumo energético de los ventiladores no fue considerado en su evaluación.

Por su parte, Alam et al. (2020), siempre para el secado de arroz en granza, lograron reducir la humedad de tres muestras de grano desde un valor promedio de 25.6% bh (0.34 bs) hasta 13.7% bh (0.16 bs); en 19.8 horas acumuladas de secado. La temperatura promedio del aire dentro del secador fue 4.6°C superior a la ambiente. Finalmente, la eficiencia energética del secador fue de 25.5%, pero al igual que Aktar et al. (2022), no consideraron el consumo energético de los ventiladores.

3.6.4 CALIDAD DEL PRODUCTO SECADO

El secado afecta la calidad sensorial, los atributos nutricionales y la capacidad de rehidratación del producto. Durante esta operación se llevan a cabo transformaciones químicas y enzimáticas las cuales no siempre son negativas. Por tanto, es necesario realizar comparación de la calidad del producto obtenido en diferentes tipos de secadores y condiciones de operación. (Leon et al., 2002).

De acuerdo a End & Dand (2015), los requisitos de calidad de la industria del chocolate y del cacao se agrupan en seis aspectos de calidad, tales como: sabor; seguridad alimentaria y salubridad; características físicas; características de la manteca de cacao; potencial de color; así como trazabilidad, indicadores geográficos y certificación.

Respecto al sabor se establece por medio de una evaluación sensorial tomando en consideración: intensidad del sabor a cacao o chocolate; aromas secundarios positivos como notas frutales o florales así como la presencia de sabores no deseados (acidez residual, astringencia y amargor, entre otros). Las dos primeras características son intrínsecas a la variedad del grano y se hacen resaltar en las operaciones del beneficiado ([sección 3.1](#) y [3.2](#)). En cambio, la existencia de sabores no deseados como un sabor muy intenso ya sea a moho ([acápite 3.4.1](#)); humo ([acápite 3.4.2](#)) o sabor ácido ([acápites 3.4.3](#) y [3.4.4](#)), evidencian un inadecuado beneficiado poscosecha ([sección 3.2](#)). (End & Dand, 2015).

En cuanto a seguridad alimentaria y salubridad, se evalúan distintas fuentes de preocupación tales como alérgenos, dioxinas, bacterias, materia extraña, metales pesados, infestaciones, hidrocarburos (minerales o aromáticos), micotoxinas y residuos de plaguicidas. La contaminación por bacterias ([acápite 3.4.1](#)); hidrocarburos, materias extrañas, micotoxinas y residuos de plaguicidas pueden asociarse parcialmente a un secado indebido o a la falta de protección del grano durante el secado. (End & Dand, 2015).

Por su parte, las características físicas engloban la uniformidad del grano y el rendimiento del material comestible. A su vez, el rendimiento del material comestible involucra, entre otros, tamaño y uniformidad de los granos, porcentaje de cáscara, contenido de humedad, granos dañados por insectos, granos aglomerados y dobles. (End & Dand, 2015).

Tal como se indicó anteriormente, otro aspecto de calidad es la manteca de cacao en el cual se consideran como características de interés tanto el contenido de Ácidos Grasos Libres (AGL) así como su dureza. Niveles elevados de AGL se atribuyen a malas prácticas poscosecha; mientras que la dureza de la manteca se relaciona tanto al origen del cacao como al nivel de AGL.

Por su parte, el potencial de color se encuentra asociado al polvo de cacao y se relaciona a factores genéticos, condiciones climáticas y procesos poscosecha, especialmente a la fermentación. Finalmente, la trazabilidad, indicadores geográficos y certificación tienen como objetivo alcanzar la calidad total del producto final a través de la posibilidad de rastrear todas las etapas de cultivo y producción, transformación y distribución. (End & Dand, 2015).

3.6.5 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico de un secador solar incluyen el costo del equipo (costo fijo), los costos del secado, y tiempo de recuperación de la inversión. Dicho análisis también debería incluir los beneficios debidos a la mejora de la calidad, mayor rendimiento, reducción del área de piso requerida y un secado más rápido. Adicionalmente al comparar un secador solar con un secador artificial se debe balancear los costos anuales de la inversión contra el ahorro de combustible. (Leon et al., 2002).

IV METODOLOGÍA

Este proyecto surge como una propuesta de innovación del Departamento de Investigación en Alimentos y Postcosecha del Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA, en el marco del Convenio de Colaboración con la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI. Por parte de la UNI, se involucraron estudiantes-tesistas y docentes-tutores de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Agrícola e Ingeniería Química.

El trabajo consistió en el diseño y evaluación de un prototipo de secador solar inflable de bolsa para el secado discontinuo de cacao recién fermentado. La contraparte INTA indicó que requería un prototipo de secador con el cual realizar experimentos para establecer tiempos, condiciones de secado y sus efectos sobre la calidad del grano para distintas variedades de cacao. Adicionalmente, debido que en el país no se cuenta con información y experiencia para el dimensionamiento de este tipo de secadores, los datos generados con este prototipo serían útiles para el dimensionamiento de nuevos equipos.

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo, la metodología se dividió en dos etapas. La primera etapa consistió en el diseño del prototipo de secador. Con esta primera etapa se dio respuesta a los tres primeros objetivos específicos de este estudio. Por su parte, la segunda etapa consistió en la evaluación experimental del prototipo de secador con lo cual se da respuesta a los tres últimos objetivos específicos.

4.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SECADOR

Esta primera etapa consistió en el dimensionamiento del prototipo, el diseño tecnológico, la selección de materiales de construcción, la determinación de sus costos de construcción, establecer las características físicas del prototipo de secador. Además, se realizaron pruebas de funcionamiento de los sensores y regulación del ventilador. Estas actividades se realizaron en simultáneo en vista que cada una de ellas tienen una relación intrínseca. Dichas actividades fueron realizadas por los equipos de trabajo de las tres carreras con el acompañamiento del INTA. Posterior a la construcción del prototipo, cada equipo se enfocó en actividades relacionadas con los objetivos de sus respectivos trabajos monográficos.

Para el dimensionamiento del prototipo de secador, por recomendación de la contraparte INTA se tomó como base un Secador de Burbuja Solar (SBD por sus siglas en inglés) perteneciente a la Asociación Nicaragüense de Arroceros, ANAR. Adicionalmente la contraparte INTA estableció la capacidad del equipo, así como la carga másica de cacao por unidad de área efectiva de secado. Por su parte, el área de secado se obtuvo aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Área de secado} = \frac{\text{Capacidad}}{\text{Densidad de carga}} \quad (4.1)$$

Se programaron reuniones de los equipos de las tres carreras, para elaborar propuestas a ser presentadas a la contraparte del INTA de dimensiones, diseño tecnológico, materiales

de construcción y costos del prototipo. Adicionalmente, se planificó una visita a las instalaciones del ANAR con el propósito de recopilar información sobre dimensiones, diseño tecnológico, materiales de construcción y funcionamiento del SBD.

Ya que el prototipo será destinado a realizar investigaciones, el diseño tecnológico incluye adicionalmente la selección de sensores, así como su cantidad y ubicación, requeridos para registrar los parámetros con los cuales dar seguimiento al proceso de secado, así como para evaluar el secador.

Una vez acordados todos los aspectos mencionados anteriormente, el INTA inició un proceso de licitación para la construcción del prototipo de secador, así como la adquisición de componentes electrónicos y fotovoltaicos.

4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PROTOTIPO DE SECADOR

Las características físicas del prototipo de secador se establecieron tomando como guía lo discutido en el [acápite 3.6.1](#). Por tanto, las características físicas del prototipo incluyen: tipo de secador, geometría, peso, dimensiones totales, dimensiones del área efectiva de secado, capacidad, y densidad de carga.

4.1.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES Y REGULACIÓN DEL VENTILADOR

Luego de la entrega del prototipo de secador ya construido y con todos los componentes electrónicos y fotovoltaicos, se realizaron pruebas de funcionamiento de los sensores y regulación del ventilador. Estas pruebas fueron llevadas a cabo en colectivo por los estudiantes-tesistas de las tres carreras.

Dicha actividad consistió en realizar pruebas del funcionamiento de los sensores de temperatura del grano, así como de la temperatura y humedad del aire. También se realizaron pruebas para la regulación del ventilador y determinando así tanto la velocidad del aire como el caudal por unidad de área efectiva de secado. Todas las pruebas previamente mencionadas, se realizaron con equipos del Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Pruebas de Funcionamiento para los Sensores de Temperatura del Grano

Para las pruebas de los sensores de temperatura del grano se empleó un baño termostático (modelo Isotemp 4100 R20), en el cual se introdujo para utilizar como referencia un termómetro de precisión de mercurio (marca VWR, rango -20 a 102°C, división 0.2°C), así como los sensores a verificar. Se registraron las lecturas cada 10°C, variando la temperatura desde 10°C hasta 70°C.

Pruebas de Funcionamiento de los Sensores de Propiedades del Aire

Los sensores de medición de propiedades del aire, en una sola pieza, miden la temperatura y humedad del aire. Ya que estos sensores no son sumergibles en agua, se construyó una caja hermética de cartón, en la cual se introdujeron, para utilizar como referencia, dos sondas TESTO (modelo TESTO 400, serie 01556412/806 y 01556382/806), así como los sensores a verificar.

Para alterar las condiciones del aire dentro de la caja, se inyectó gradualmente 2cc de agua a 100°C. Las condiciones internas se mantenían homogéneas haciendo circular el aire por medio de un pequeño ventilador. De esta manera la temperatura varió desde 17°C hasta 37°C; y a su vez la humedad relativa del aire osciló desde 55% hasta 90%. Los resultados de estas pruebas se muestran en el Anexo Digital E.

Regulación del ventilador

Para la regulación del ventilador del prototipo de secador se empleó un anemómetro digital con hélice de 7 cm de diámetro (marca HTi, modelo HT-9819, rango 0.40 a 30.00 m/s, resolución 0.01 m/s, precisión $\pm [3\% + 0.20 \text{ m/s}]$). Se definió una variable de trabajo de porcentaje de PWM, la cual corresponde a las revoluciones por minuto (RPM) del ventilador entre su máxima RPM.

Se registraron las lecturas cada 5% PWM, variando desde 65% hasta 100%. El registro inicia en 65% ya que es el valor mínimo al cual se infla completamente el prototipo de secador. Tomando como guía lo discutido en el [acápite 3.6.2](#), se estableció una velocidad del aire de secado constante a un funcionamiento del 75% PWM, la cual corresponde a 3.98 m/s y una potencia de 60 W.

4.2 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR

Posterior a la primera etapa detallada anteriormente, se procedió a la segunda etapa de este trabajo la cual consistió en la evaluación experimental del equipo. El prototipo de 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.

La contraparte del INTA indicó que los experimentos debían realizarse con cacao recién fermentado y de preferencia en zonas productivas del grano. Por tanto, contactó a productores interesados en colaborar con esta investigación quienes debían proporcionar parte de su cacao recién fermentado para ser secado en el prototipo, así como facilitar un espacio de trabajo en sus instalaciones. En principio se planificaron dos viajes a las instalaciones del productor contactado por el INTA, el primer viaje con finalidad de verificar el funcionamiento del prototipo y realizar los ajustes que fuesen necesarios. Por

su parte, el segundo viaje tenía como propósito llevar a cabo la evaluación experimental del equipo.

4.2.1 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DEL PROTOTIPO

El desempeño térmico del prototipo se evaluó realizando experimentos de secado con cacao recién fermentado. El desempeño térmico del equipo (sección 3.6) 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.

Para el desarrollo de los experimentos se tomaron en cuenta las recomendaciones indicadas en los [acápites 3.4.3](#) y [3.4.4](#), así como los procedimientos aplicados por los productores contactados por el INTA. Por tanto, 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 prototipo: 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 procede a secar los granos de cacao en el prototipo de 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 exponen los granos de cacao la mayor cantidad de tiempo posible.

A continuación, se describe cómo se llevaron a cabo los experimentos de secado. Primeramente, se instaló el prototipo en 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 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 Gehaka, modelo G600i, rango de medición de 5% a 40% en base húmeda; 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 superará 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 siguiendo el método de determinación de contenido de humedad (método al horno) descrito en el anexo F de la norma internacional ISO 2451:2017 (ISO, 2017) y aplicando la ecuación:

$$X = \frac{\text{masa inicial de la muestra} - \text{masa final de la muestra}}{\text{masa final de la muestra}} \quad (4.2)$$

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 4.1](#)). En este esquema se presume que la longitud y el ancho del lecho de granos no son iguales a la longitud y ancho del área de secado del prototipo. Sin embargo, si se cubre el área total de secado del prototipo, la distribución sería la misma.

Cada 30 minutos, en cada zona se mezclaron manualmente (volteo) los granos, tratando así de asegurar 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.

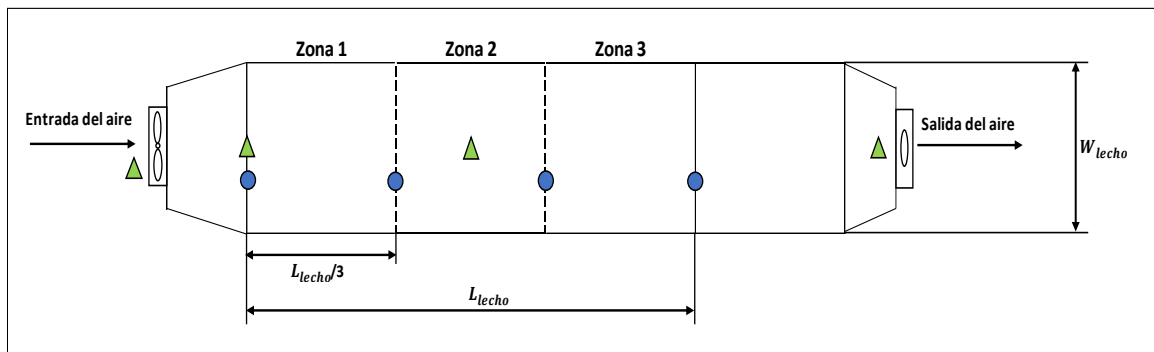


Figura 4.1 Esquema del prototipo de secador indicando los puntos para registro de propiedades del aire y del grano. L_{lecho} : longitud del lecho de granos; W_{lecho} : ancho del lecho de granos; triángulos, puntos para registro de propiedades del aire; círculos: puntos para registro de propiedades 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 4.1](#). Simultáneamente, se registraron la temperatura y humedad relativa del aire en los cuatro puntos de muestreo representados por triángulos en la [Figura 4.1](#). Todos los parámetros previamente mencionados fueron leídos empleando los sensores seleccionados de acuerdo a lo indicado en la [sección 4.1](#).

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 del secado con granos de cacao, siempre un sensor se ubicaría al inicio del lecho y los demás cada tercio del lecho. En cuanto los sensores para registro de propiedades del aire, uno de los sensores siempre estaría ubicado externamente y otro a la salida, según la [Figura 4.1](#); 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/m², 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.

Con los datos obtenidos durante los experimentos se construyeron gráficas de las propiedades del aire, del grano en los diferentes puntos de muestreo, así como la irradiancia solar en función del tiempo tomando como guía las gráficas mostradas en el [acápite 3.6.2](#).

4.2.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL PROTOTIPO

Se determinó la eficiencia energética del prototipo mediante la [ecuación 3.2](#) ([acápite 3.6.3](#)) para cada día de experimento. Con el fin comparar resultados reportados en la literatura, la eficiencia energética promedio del prototipo de 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:

$$\eta_{dia,con} = \frac{E_{ev,dia}}{E_{T,dia}} \quad (4.3)$$

La segunda manera, denotada $\eta_{dia,sin}$, no considera la energía consumida por el ventilador y por tanto la [ecuación 4.3](#) se reescribe como:

$$\eta_{dia,sin} = \frac{E_{ev,dia}}{E_{S,dia}} \quad (4.4)$$

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

$$E_{ev,dia} = \int_{t_{i,dia}}^{t_{f,dia}} \dot{m}_{w,dia} \lambda_v dt \quad (4.5)$$

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, $m_{broza,dia}$:

$$m_{w,dia} = m_{i,dia} - m_{f,dia} - m_{broza,dia} \quad (4.6)$$

Tal como se detalló anteriormente, en el caso de extraer muestras de cacao para determinar su humedad con el método al horno, la [ecuación 4.6](#) propuesta para calcular la cantidad de agua evaporada por cada día, $m_{w,dia}$, debería ser modificada para considerar las mermas debidas al retiro de muestras de cacao para determinar su humedad, $m_{muestras,dia}$. Por tanto, la ecuación modificada para calcular $m_{w,dia}$ es:

$$m_{w,dia} = m_{i,dia} - m_{f,dia} - m_{muestras,dia} - m_{broza,dia} \quad (4.7)$$

El calor latente de vaporización, λ_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 en el [acápite 4.2.1](#). Por tanto, la [ecuación 4.5](#) se evaluó de la siguiente manera:

$$E_{ev,dia} = m_{w,dia} \lambda_v (\bar{T}_{sol,dia}) \quad (4.8)$$

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 ([acápite 4.2.1](#)).

$$E_{S,dia} = A_{lecho} \int_{t_{i,dia}}^{t_{f,dia}} G_T(t) dt \quad (4.9)$$

La integral de la [ecuación 4.9](#) 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 aplicando la [ecuación 3.4](#) para un secador directo y activo, por tanto:

$$E_{T,dia} = E_{S,dia} + E_{f,dia} \quad (4.10)$$

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:

$$E_{f,dia} = P_f (t_{f,dia} - t_{i,dia}) \quad (4.11)$$

4.2.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CACAO

La calidad del cacao secado en el prototipo de secador se estableció a través de los aspectos de calidad: sabor y características físicas ([acápite 3.6.4](#)). Para la evaluación de estos dos aspectos, se sometieron muestras de cacao procesado en el prototipo de 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 prototipo de secador.

V PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a lo indicado previamente en la metodología ([capítulo IV](#)) este estudio se dividió en dos etapas. La primera etapa tuvo como propósito dar respuesta a los tres primeros objetivos específicos. La segunda etapa tuvo el propósito de dar respuesta a los tres últimos objetivos específicos. Las siguientes dos secciones se corresponden con las dos secciones de la metodología. Algunos resultados se presentan en formato digital, tal es el caso de los Anexos digitales A, B, C, D, E, F, G; H, I; los cuales se encuentran en el CD-ROM entregado como parte de esta monografía.

5.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SECADOR

Tal como se indicó en la [sección 4.1](#), el dimensionamiento, diseño tecnológico, así como la selección de materiales de construcción y los costos de construcción del prototipo de secador solar inflable de bolsa, se desarrollaron en simultáneo por los equipos de trabajo de las tres carreras con el acompañamiento del INTA.

Se realizaron una serie de reuniones del 10 al 20 de septiembre del 2018 en las cuales se establecieron las dimensiones, los materiales disponibles en el mercado nacional, así como los costos del prototipo de secador. Evidencia de algunas de las reuniones y de borradores de diseño del prototipo se presentan en el Anexo Digital A.

Para el diseño y dimensionamiento del prototipo de secador se tomó en consideración la capacidad del equipo, así como la carga másica de cacao por unidad de área efectiva de secado, establecidas por la contraparte INTA. Además, se analizaron las características de secador desarrollado por Salvatierra-Rojas et al. (2017) y la información del SBD50 en manuales, imágenes y videos disponibles en el sitio web de la empresa GrainPro®, también se utilizaron fotografías del secador propiedad de la ANAR. Los planos, con detalles de las partes del prototipo de secador, se presentan en el [Anexo A](#).

En base a los materiales disponibles en el mercado nacional, sus características y costos, se decidió que el equipo se construiría con: lona vinílica impermeable reforzada con fibra de poliéster y con recubrimiento de PVC, color negro; y plástico UV-ATG 50%, color blanco. Además, se identificó un taller de costura con capacidad para confeccionar tanto el prototipo de secador como un maletín para guardarlo y portarlo.

Durante las reuniones, también se acordaron los parámetros a medir para la evaluación del prototipo, los cuales ya han sido detallados en el [acápito 4.2.1](#) de la metodología. Adicionalmente, se identificaron los parámetros que requerían su medición a través de sensores colocados en el prototipo de secador: temperatura y humedad relativa del aire, y temperatura del grano. La Figura A.8 del Anexo Digital A evidencia los parámetros acordados para la evaluación del prototipo.

En base a cotizaciones (Figura B.1 hasta Figura B.6 del Anexo Digital B), obtenidas de proveedores locales, se elaboró y remitió el 21 de septiembre de 2018, un presupuesto de

proyecto de investigación a la contraparte del INTA. El costo total de construcción del prototipo fue de C\$ 63,784.79, equivalente con la tasa cambiaria de ese día a \$ 2,001.60.

El documento remitido a la contraparte del INTA se muestra en el Anexo Digital C. Por su parte, la contraparte del INTA, teniendo en cuenta este presupuesto, inició un proceso para búsqueda y aprobación de fondos y seguidamente una apertura de licitación para la construcción del prototipo de secador.

Posteriormente, se realizó una visita a las instalaciones de la ANAR con el objetivo de recabar información acerca del SBD que está en su poder. Durante esta visita se establecieron detalles finales para la construcción del prototipo de secador, a saber: tipo de costura, geometría de la salida del aire, ajustes, solapa de cubrimiento, funcionamiento, entre otros. Evidencia de esta reunión se presenta en el Anexo Digital D.

5.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PROTOTIPO DE SECADOR

Primeramente, se presentan las características físicas del prototipo de secador, como parte de los resultados del diseño del prototipo de secador. El equipo estuvo a disposición en agosto del 2020. El prototipo de secador solar es de tipo túnel semicilíndrico el cual se corresponde a su homólogo SBD descrito en el [acápite 3.5.2](#). Las dimensiones del prototipo, así como imágenes de éste se muestran en el [Anexo A](#).

Al inflar el prototipo sin carga se pueden observar tres secciones: una primera sección cónica de longitud 0.54 m; la segunda sección con forma cilíndrica de 4.90 m de longitud; y una última sección también cónica de longitud 0.71 m. Por tanto, la longitud total del prototipo es de 6.15 m ([Figura A.1](#)).

Tanto la primera como la tercera sección fueron construidas de lona vinílica impermeable reforzado con fibra de poliéster y con recubrimiento de PVC, color negro. Por su parte, la sección cilíndrica está conformada de dos piezas rectangulares: una (el fondo) de la misma lona vinílica ya mencionada, de ancho 2.00 m; y la otra (la cubierta), de plástico UV-ATG 50%, color blanco, de ancho 1.48 m. ([Figuras A.4](#) hasta [Figura A.10](#)). Las dos secciones cónicas se encuentran cosidas al fondo; mientras que la cubierta se une a ellas mediante una cremallera de alta resistencia ([Figura A.8](#)).

El fondo de lona vinílica es el área de secado, en la cual se coloca el grano a secar. Para evitar que el grano salga del equipo al momento de realizar el volteo, se deja al menos un margen de 0.10 m a cada lateral del rectángulo. Tomando en cuenta estos márgenes, el área útil de secado es siempre un rectángulo de 8.82 m² (empleando la [ecuación 4.1](#)), pero de longitud 4.90 m y 1.80 m de ancho.

Algunas de las características físicas del prototipo de secador ya construido se resumen en la [Tabla 5.1](#) (basada en el [acápite 3.6.1](#)). En base a los pesos del prototipo de secador mostrados en la [Tabla 5.1](#) ([Figura A.12](#) hasta [Figura A.14](#)), el secador y su maletín corresponde aproximadamente al 19% del peso total. En cambio, la batería y el panel solar representan casi el 72% del peso total.

De resultar una versión comercial de este prototipo y si el equipo se va a utilizar en una zona remota sin acceso a suministro eléctrico, se debe tomar en cuenta que el conjunto batería-panel son los elementos con mayor peso del secador. Por el contrario, si el equipo se usará en una zona que cuenta con suministro eléctrico, podría ofertarse una variante que funcione con dicho suministro; por tanto, se tendría una disminución considerable del peso total del equipo de secado.

Tabla 5.1 Características físicas del prototipo de 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 m ²	
	Longitud	4.90 m	
	Ancho	1.80 m	
Área de Cubierta		7.25 m ²	
	Longitud	4.90 m	
	Ancho	1.48 m	
Capacidad (Cacao recién fermentado)		177 kg	
	Densidad de carga	20 kg/m ²	
	Espesor del lecho	3 cm	

*Los accesorios comprenden: 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 ([Figura A.11](#)).

De acuerdo a la clasificación descrita en el [acápito 3.5.1](#), el prototipo de secador desarrollado, respecto a la forma de aprovechar la radiación es híbrido directo. Se espera que funcione principalmente como un secador directo mientras se cuente con radiación solar. Sin embargo, para ocasiones con muy baja o nula radiación solar, se le incorporó 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 ([Figura A.11](#)).

Tal como se indicó en la [sección 4.1](#), la contraparte del INTA estableció la capacidad del equipo para cacao recién fermentado ([Tabla 5.1](#)); la cual fue estimada de acuerdo a la

producción máxima de grano obtenida por cosecha por un mediano productor. De igual manera, la contraparte del INTA estableció tanto la densidad de carga como el espesor del lecho.

5.1.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES Y REGULACIÓN DE VENTILADOR

Siguiendo el procedimiento descrito en el [acápite 4.1.2](#) de la metodología, se realizaron pruebas de funcionamiento de los sensores de temperatura del grano y propiedades del aire. Los resultados de dichas pruebas se presentan en el Anexo Digital E. En base a estos resultados los estudiantes-tesistas del equipo de trabajo de la carrera de Ingeniería Electrónica realizaron las calibraciones y programaciones correspondientes. Para más detalles del trabajo realizado por dicho equipo, consultar Gonzales & Alejos (2021).

En cuanto a la regulación de ventilador, se construyó la Tabla E.1, del Anexo Digital E, en la cual se presentan en la primera columna las revoluciones por minuto del ventilador, la PWM en la segunda columna, la potencia de trabajo del ventilador en la tercera columna. Finalmente, en la última columna de esta tabla se presenta la velocidad del aire registrada por el anemómetro.

Tal como se detalló en la metodología, la potencia de operación del ventilador se fijó en 75% PWM; y con la velocidad del aire registrada por el anemómetro a dicha potencia, se calculó la velocidad promedio del aire dentro del prototipo y caudal por unidad de área ([Anexo E](#)).

La velocidad promedio del aire desecante dentro del prototipo, se mantuvo constante en 0.017 m/s durante todos los períodos de exposición solar; lo cual corresponde a 0.31 m³/min por metro cuadrado de área de lecho del grano. Al comparar con las recomendaciones de la literatura, [acápite 3.6.2](#); la velocidad de operación mencionada previamente corresponde a alrededor del 43% de la velocidad sugerida por Wood (1961) para el período de velocidad decreciente. A su vez, el caudal por área de secado ronda el 41% de la recomendada por Leon et al. (2002). Sin embargo, hay que recordar que Wood & Lass (1985) han indicado que “las condiciones más económicas para cada secador en particular deben ser determinadas experimentalmente”.

5.2 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR

De acuerdo a lo detallado en la [sección 4.2](#), la segunda etapa de este trabajo consistió en evaluar el desempeño térmico y la eficiencia energética del prototipo de secador, así como la calidad del cacao seco, siguiendo la metodología descrita en los [acápites 4.2.1 a 4.2.3](#). Primeramente, se presentan los resultados de la verificación del funcionamiento del prototipo en las instalaciones de la finca de la productora de cacao contactada por la contraparte del INTA. Por último, se presentan los resultados de la evaluación del desempeño térmico del prototipo de secador llevado a cabo en el Recinto Universitario Simón Bolívar, RUSB.

5.2.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Tal como se indicó en la [sección 4.2](#), la contraparte del INTA contactó a la productora de cacao doña Eufemia Woo y gestionó una visita a la finca Tininiska, ubicada en el municipio de Waslala, Región Autónoma del Caribe Norte. La finalidad de esta primera visita fue verificar el funcionamiento del prototipo de secador. Todos los gastos asociados a esta visita fueron financiados con fondos de proyectos del INTA.

El 25 de junio de 2021, los tres equipos multidisciplinarios con personal del INTA llegaron a la finca Tininiska, para permanecer trabajando durante cuatro días en el sitio. El cacao con el cual se iba a trabajar aún se encontraba en proceso de fermentación por lo cual se debió esperar hasta el día siguiente para iniciar el proceso de secado. Por tanto, se destinaron tres días de secado a partir del segundo día de estadía.

El primer día se aprovechó para visitar los alrededores de la finca y conocer las áreas cultivadas de cacao. En esta finca se siembran cinco variedades (clones) PMCT-58, ICS-95, CATIE-R4, CATIE-R6 y CC-137 ([Figura B.1](#)); la masa que se encontraba fermentando era una mezcla de estas. El prototipo de secador se colocó en una ubicación, a la intemperie, estipulada en común acuerdo con la propietaria ([Figura B.2](#)); con su entrada orientada a 220°SO ([Figura B.3](#)); sin producto, pero con todos los sensores de medición de parámetros.

El segundo día se dispuso de 13.60 kg (30 libras) de cacao recién fermentado con humedad inicial 32% bh el cual se procesó en el prototipo ([Figura B.4](#)). Al mismo tiempo la propietaria de la finca inició su proceso habitual de secado en marquesinas, las cuales estaban colocadas bajo techo de láminas translúcidas ([Figura B.5](#)).

Dada las condiciones climáticas adversas de intensas y continuas lluvias, a partir del segundo día de secado se debió ubicar el prototipo de secador en la misma área techada de las marquesinas ([Figura B.6](#)). Al final del tercer día de secado, la humedad del cacao procesado en el prototipo fue de 14.2% bh contra 26% bh del cacao secado en marquesina.

Vencido el plazo de estadía, por recomendación de la contraparte INTA se decidió continuar con el proceso de secado en Managua. Por lo tanto, el secado se reanudó el 30 de junio, en el Centro Nacional de Investigación Agropecuaria (CNIA), extendiéndose el proceso por cuatro días ([Figura B.7](#)). Al finalizar esta prueba de siete días de secado, la masa final de cacao fue de 7.60 kg (16.74 libras) con humedad final de 6.6% bh. Por su parte, la propietaria de la finca Tininiska reportó una humedad final de 9.8% bh para el cacao secado en marquesina en su finca.

Durante toda esta etapa la tarjeta controladora del prototipo no almacenó continuamente información con la cual se pudiese evaluar el desempeño térmico ni la eficiencia energética del secador. Por tanto, los estudiantes-tesistas del equipo de Ingeniería Electrónica procedieron a realizar las reparaciones correspondientes. Posteriormente, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento del equipo secando maíz (Anexo Digital F). Sin embargo, nuevamente la tarjeta controladora no almacenó la información requerida.

Esto último implicó una segunda reparación. Una vez más se realizaron pruebas de verificación de su funcionamiento secando maíz. Comprobado el buen funcionamiento se procedió a la evaluación del prototipo secando cacao.

5.2.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DEL PROTOTIPO

Tal como se indicó en el [acápite 4.2.1](#), el desempeño térmico del prototipo de secador se estableció determinando: 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.

Dado que no fue posible una segunda visita de campo en la finca Tininiska, los estudiantes-tesistas del equipo de Ingeniería Química procedieron a contactar a la propietaria de la finca para adquirir cacao recién fermentado y proceder a realizar la evaluación del prototipo.

El prototipo de 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 ([Figura C.1](#)). En cuanto al tiempo de exposición solar, los granos de cacao se procesaron según el tiempo indicado en la metodología ([acápite 4.2.1](#)) durante cinco días de exposición solar. En todo este período no se activó la resistencia térmica; es decir, el prototipo de secador operó exclusivamente como secador directo.

Se procesaron 84.60 kg (186.46 lb) de cacao recién fermentado ([Figura C.2](#)) y se obtuvo 44.55 kg (98.19 lb) de cacao seco ([Figura C.3](#)). Los granos de cacao se distribuyeron en el prototipo partiendo del inicio del área útil hasta cubrir 3 m a lo largo del secador, L_{lecho} , ([Figura C.4](#)). 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 m² ([Figura C.4](#)). El espesor del lecho, e_{lecho} , se mantuvo en 3 cm ([Figura C.5](#)).

Por su parte, los sensores para registro de temperatura del cacao, T_{Cacao} , así como los sensores para registro de temperatura del aire, T_{Aire} , y humedad relativa del aire, HR , se distribuyeron según lo detallado en el [acápite 4.2.1](#) de la metodología ([Figura C.6](#) hasta [Figura C.9](#)).

Tal como se indicó en la metodología, el lecho de grano se dividió en tres zonas, cada una de las cuales resultó de 1 m de longitud. Cada 30 minutos, los granos de cada zona se mezclaron manualmente e inmediatamente se tomaron muestras de 7 granos de cacao, de cada una de las tres zonas de muestreo ([Figura C.10](#)). La humedad en base seca de estos granos, X , se obtuvo empleando el método al horno descrito en el anexo F de la norma internacional ISO 2451:2017 (ISO, 2017) ([Figura C.11](#)).

Cada día al finalizar el tiempo de exposición solar, los granos de cacao se guardaron en dos sacos limpios ([Figuras C.13](#) y [C.14](#)) y se almacenaron durante la noche en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos. Por lo general el Laboratorio de Ingeniería de Procesos esta

entre un rango de entre 25-30°C y humedad relativa de entre 60-70%. La masa total de cacao al inicio del tiempo de exposición solar, así como la masa total al final de dicho tiempo se midieron empleando una báscula TCS Electronic Platform Scale, capacidad 300 kg, peso mínimo 0.05 kg (Figura C.15).

Finalmente, la energía total solar incidente, G_T , se anotó cada 3 minutos como se indica en la metodología (Figuras C.16 y C.17).

Tiempo y Velocidad de Secado del Cacao

Primeramente, se presentan los resultados de los dos parámetros: tiempo de secado y velocidad de secado; este último por medio de gráficas de contenido de humedad del cacao respecto al tiempo.

Los datos de humedad en base seca de los granos de cacao recolectados en las tres zonas de muestreo se encuentran en la Tabla D.1. Para cada tiempo de muestreo, con las humedades de cada zona se calculó el promedio para todo el lecho, el cual se presenta en la última columna de la tabla mencionada. Adicionalmente, los datos de temperatura del lecho de cacao se presentan en la Anexo Digital G.

Con los datos de estas dos tablas se construyó la Figura 5.1, tomando como guía las Figuras 3.7 y 3.15. Esta figura incluye los resultados de los cinco días de secado. En todas las gráficas, el eje de las abscisas corresponde a la hora local. Para las gráficas superiores, el eje de las ordenadas se refiere a la humedad en base seca del grano; mientras que para las gráficas inferiores a la temperatura del lecho de cacao.

En las gráficas superiores de la Figura 5.1, se observa que la humedad del grano se redujo considerablemente en los primeros días: a casi la mitad del valor inicial de humedad del cacao en los primeros dos días y en un día más, a menos de un tercio de dicho valor. Por el contrario, en los días siguientes la reducción de la humedad fue lenta: en el cuarto día se redujo menos de 0.2 unidades y en el último día apenas 0.05.

Al final del quinto día la humedad en base seca fue de 0.08 kg H₂O/kg ss, o bien 7.4% bh, valor aceptable ya que se encuentra por debajo del 8% bh recomendado por la mayoría de la literatura (acápite 3.4.1).

De acuerdo a la tendencia observada en las gráficas de humedad del grano se requeriría de uno a dos días adicionales de secado para alcanzar el 6.5% bh solicitado por la contraparte del INTA. Para ese mismo día en la gráfica de temperatura del lecho de cacao se observa que al inicio del lecho se alcanzan temperaturas de 60°C. Se debe tener en cuenta que la temperatura del grano no debe superar los 65°C (Wood & Lass, 1985). En base a la tendencia observada en las gráficas de temperatura del cacao, es probable que en dos días adicionales de secado se alcancen temperaturas superiores a dicho valor límite.

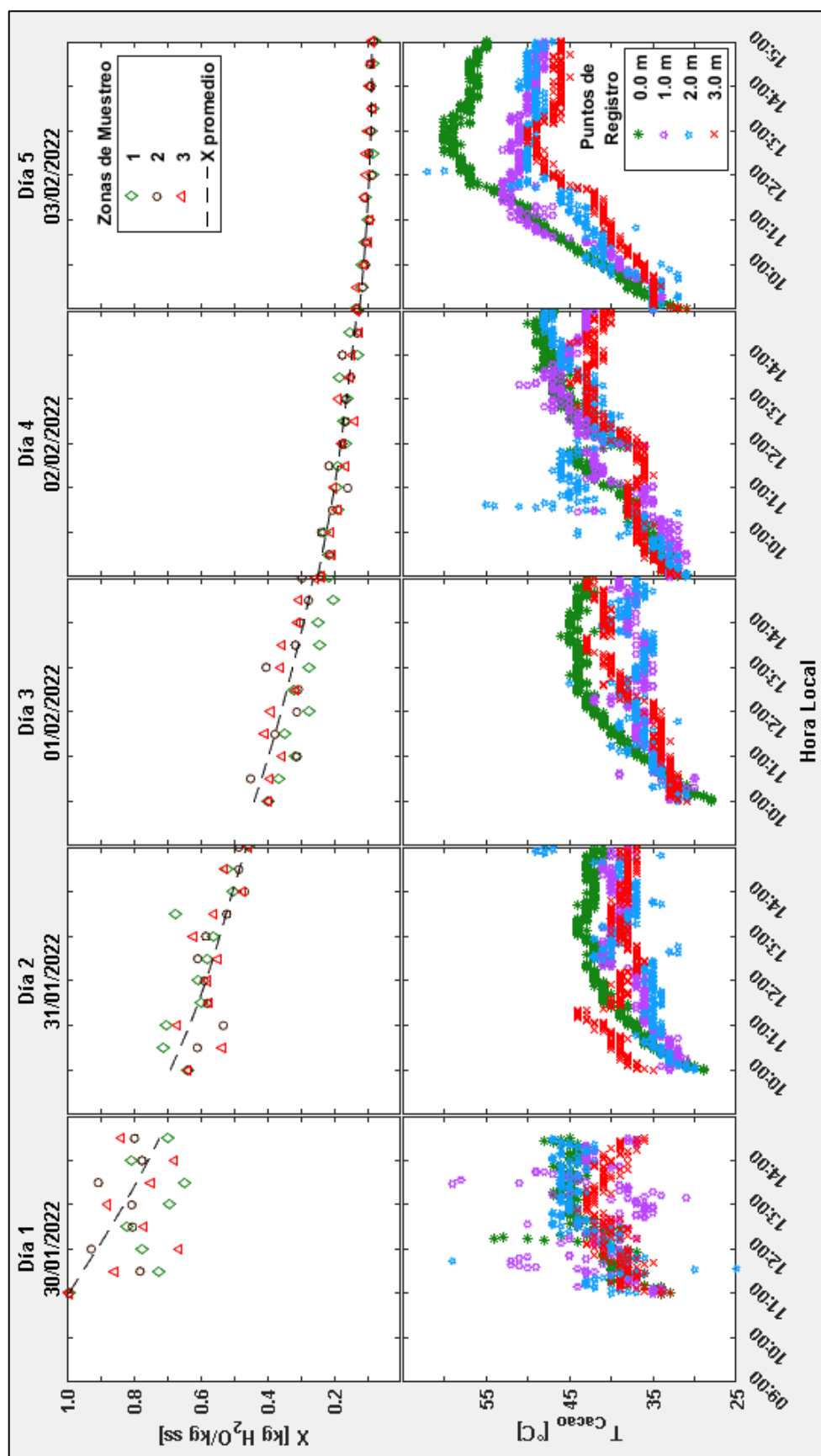


Figura 5.1 Variación de la humedad de los granos de cacao, en base seca (gráficas superiores), y de la temperatura del lecho de cacao (gráficas inferiores), como función de la hora local, para los cinco días de secado. Tanto las zonas de muestreo, así como la ubicación de los sensores en los puntos de registro es según la Figura 4.1.

En los primeros dos días de secado se percibió un fuerte olor a ácido acético, el cual se redujo gradualmente a partir del tercer día hasta no percibirse en el último día. Estas observaciones concuerdan con lo señalado en la literatura (IPADE, 2010; PROCOMER, s.f) la cual indica que la remoción de los ácidos se completa en un máximo de tres días.

También, en los primeros dos días al realizar el mezclado de los granos se observó una película de agua en el fondo del prototipo de secador (Figura C.12), lo cual indica que parte del agua en lugar de evaporarse migraba hacia la parte inferior del lecho. Este fenómeno concuerda con lo reportado por Salvatierra et al. (2017). Al final de esos dos días, una vez retirado el cacao del prototipo, se dejó abierto el secador para que el agua se evaporará.

Una última observación con respecto a la humedad del grano es que no se tuvo rehumidificación durante los períodos de almacenamiento en el laboratorio, en contraste con los resultados mencionados por Sandy et al. (2015). Por el contrario, se observó pérdidas de masa de entre 1-7%, similar a los reportados por Hill, Law & Cloke (2008) de 1-5%, quienes indican que esta pérdida durante los períodos de almacenamiento puede ser debida al calor residual en los granos de cacao (Figura C.20). Los datos del agua evaporada durante los períodos de almacenamiento se presentan en la Tabla G.1.

Adicional a la Figura 5.1 recién analizada, con los datos de la Tabla D.1 se construyó la Figura 5.2, tomando de referencia a la Figura 3.12(a). Esta figura 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.

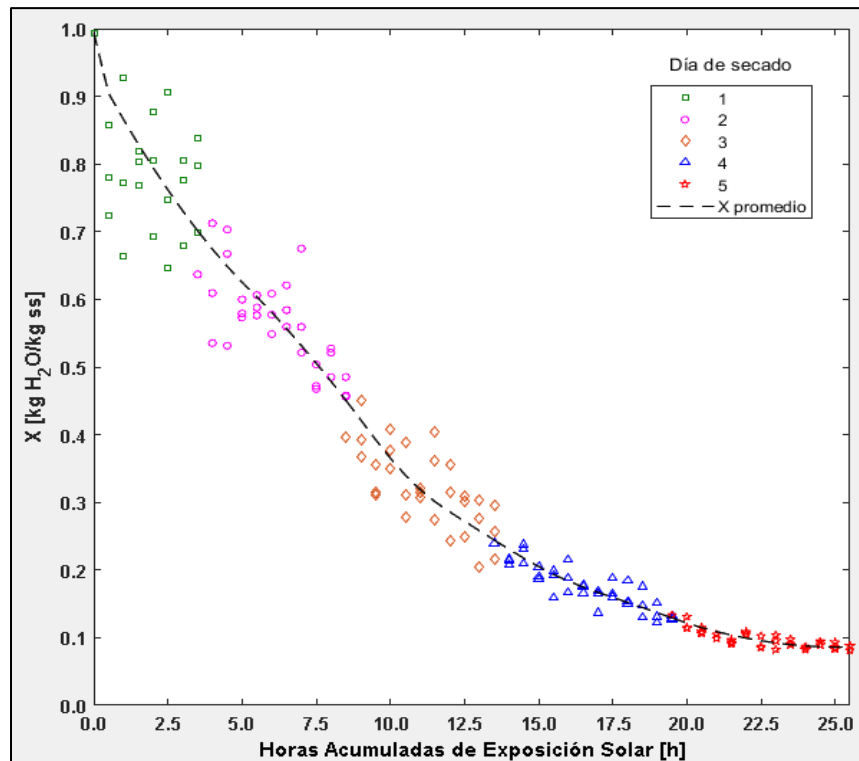


Figura 5.2 Humedad en base seca del cacao como función de las horas acumuladas de exposición solar.

Combinando la información de las [Figura 5.1](#) y [5.2](#), se puede decir 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; con solo 25.5 horas acumuladas de exposición solar y el resto del tiempo correspondiente a los períodos de almacenamiento.

En la [Figura 5.2](#) se aprecia que para alcanzar la mitad de la humedad inicial del lecho (0.5 kg H₂O/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 H₂O/kg ss); y para reducir la humedad hasta su valor final fueron necesarias 11.5 h adicionales.

En contraste, para el cacao procesado con el tratamiento T1 del trabajo realizado por Sandy et al. (2015), se requirieron 88 horas continuas de secado, las cuales representan más del triple del tiempo demandado en este estudio. 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 5.2](#) solamente describe comportamientos decrecientes de la humedad lo cual coincide con lo reportado por Baryeh (1985), cuyos resultados ya fueron analizados en el [acápite 3.4.5](#).

Comportamiento de la Irradiancia y de las Propiedades del Aire

El desempeño térmico del prototipo de secador también se evaluó construyendo gráficas de las propiedades del aire desecante, así como de la energía solar incidente con respecto al tiempo de acuerdo a lo discutido en el [acápite 3.6.2](#).

Los datos de energía solar total incidente se encuentran en el Anexo Digital H. Mientras que los datos de temperatura y humedad relativa del aire se muestran en la [Anexo Digital I](#). Desafortunadamente, el sensor de propiedad del aire ubicado a 1.5 m del inicio del área útil de secado presentó fallas, por lo cual la tabla previa no incluye las propiedades del aire en este punto de registro.

Con los datos de las dos tablas se construyó la [Figura 5.3](#), tomando como guía a las [Figuras 3.13](#), [3.14](#) y [3.18](#). En esta figura el eje de las ordenadas corresponde a: gráficas superiores, energía solar total incidente por unidad de área (irradiación); gráficas intermedias, temperatura del aire; y gráficas inferiores, humedad relativa del aire. De igual manera que las gráficas de la [Figura 5.1](#), el eje de las abscisas corresponde a la hora local.

Al analizar las gráficas superiores de irradiación, G_T , se observan valores máximos rondando los 1200 W/m² entre las 11:00 y las 13:00 horas. Por su parte, los valores

mínimos de irradiancia (sin considerar los generados por el paso ocasional de nubes), se registraron al final del día con un rango de 600 a 700 W/m². El área bajo la curva sombreada en celeste, corresponde a la energía solar total por día, $E_{s,dia}$, la cual fue calculada empleando la [ecuación 4.5](#) utilizando el programa MATLAB ([acápite 4.2.2](#)) y el pseudocódigo se presenta en el Anexo F.

Al observar las gráficas intermedias de la Figura 5.3 de temperatura del aire, se aprecia que la temperatura a la entrada del secador muestra una tendencia a aumentar durante el día, desde valores mínimos cercanos a los 30°C hasta valores máximos de 38°C. Por su parte, la temperatura a 0.0 m de la sección de secado estuvo casi siempre por encima de los 40°C, alcanzando valores máximos cercanos a los 55°C. Esto indica incrementos de temperatura con respecto a la temperatura de entrada de 2°C hasta 20°C.

Por su parte, la temperatura del aire a la salida del prototipo, la mayoría de los días es similar a la temperatura del aire en el punto de registro a 0.0 m. Hubo una diferencia apreciable entre estas temperaturas el día dos, con valores máximos de hasta 11°C y con valor más frecuente de 9°C. También se observó una diferencia considerable entre estas dos temperaturas en el día cinco a partir de las 11:30 horas manteniéndose hasta el final del día, con valores máximos de 10°C y en promedio alrededor de 5°C.

Finalmente, al examinar las gráficas inferiores de humedad relativa del aire, HR , ([Figura 5.3](#)), indican que la HR a la entrada al secador (es decir, del aire ambiental), tiende a disminuir durante el día. Conforme se iniciaba más temprano los experimentos la HR era mayor; siendo los primeros tres días de alrededor de 65%, y los dos últimos días cercanas al 80%. Para casi todos los días al culminar los períodos de exposición solar, la HR ambiental rondaba el 55%.

En el caso de la HR a 0.0 m, los primeros tres días sus valores tienden a oscilar entre el 30 y 40%. Esto indica una reducción de entre 20 y 30 puntos porcentuales en comparación con la HR ambiental; tendiendo a incrementar la diferencia en el transcurso de los días. Para los últimos dos días, se puede apreciar una diferencia entre estas dos humedades relativas de alrededor de 20 puntos porcentuales; y la HR a 0.0 m tiende a disminuir durante el día, tal como se observa para la HR del ambiente.

Por su parte, con respecto a la HR a la salida del secador: el primer día, permaneció ligeramente por debajo de la HR del ambiente; en el segundo día, osciló entre los valores de la HR ambiental y la HR a 0.0 m; mientras en el tercer día, se observa que en las primeras dos horas de exposición se encuentra ligeramente por encima de la HR del aire a 0.0 m y posteriormente ambas HR son prácticamente iguales. Finalmente, en los últimos dos días la HR a la salida permaneció levemente por debajo que la HR a 0.0 m, presentando la misma tendencia a disminuir durante el día.

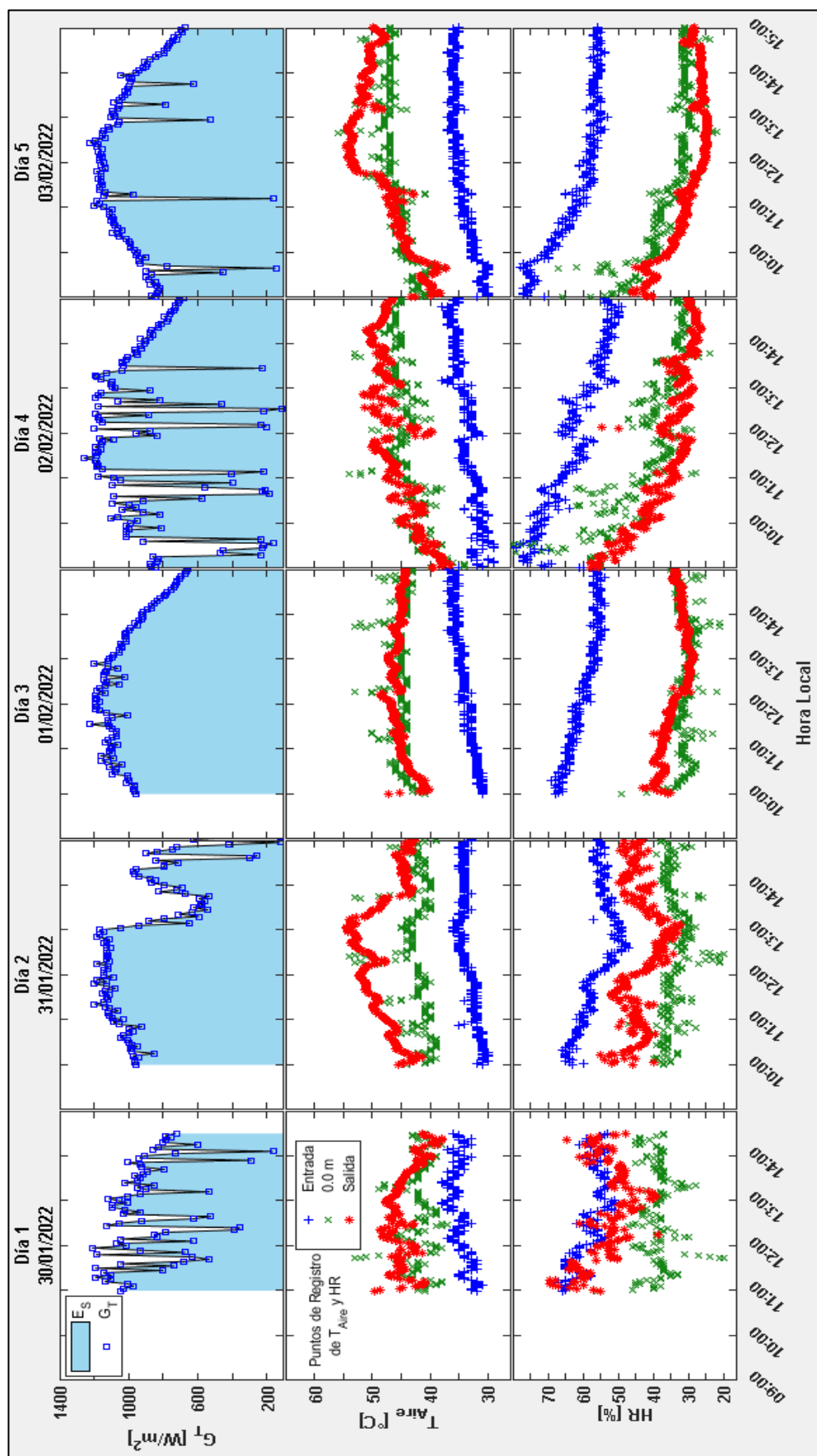


Figura 5.3 Variación de la irradiancia (gráficas superiores), la temperatura del aire (gráficas centrales), y de la humedad relativa del aire (gráficas inferiores) como función de la hora local, para los cinco días de secado.

Con los datos de temperatura y humedad relativa del aire (en Anexo Digital I), se calculó la humedad absoluta del aire, ω , empleando el programa EES; estos resultados se presentan en las últimas tres columnas de dicha tabla. Seguidamente se construyó la [Figura 5.4](#), cuyo eje de las ordenadas corresponde a la humedad absoluta del aire desecante y el eje de las abscisas a la hora local.

Se puede observar que, en los primeros tres días la ω en el punto de registro a 0.0 m es muy cercana a la ω del ambiente. En cambio, en el cuarto día la ω a 0.0 m parte de valores cercanos a la ω ambiental, rápidamente duplica su valor y luego decrece gradualmente durante el día hasta llegar a ser nuevamente igual a la ω ambiental, hacia el final del período de exposición solar. Finalmente, al inicio del quinto día la ω a 0.0 m parte de un valor 50% superior a la ω del ambiente, reduciéndose gradualmente hasta que tienden a ser iguales, a la mitad del tiempo de exposición solar.

Este comportamiento de la ω en el punto de registro a 0.0 m en comparación con la ω del ambiente, es de esperar dado que previo al punto de registro a 0.0 m no hay granos de cacao que aporten humedad al aire desecante; por tanto, no debería haber aumento en el valor de la humedad absoluta antes del punto de registro a 0.0 m.

Por su parte, la ω a la salida del prototipo los dos primeros días estuvo por encima de la ω a 0.0 m. En el primer día, la ω a la salida partió de un valor cercano al doble de la ω a 0.0 m (0.040 kg H₂O/kg as), reduciéndose gradualmente durante el día hasta 0.026 kg H₂O/kg as. En el segundo día, la ω a la salida ascendió hasta casi 2.5 veces de la ω a 0.0 m (aproximadamente 0.045 kg H₂O/kg as) y luego descendió gradualmente hasta el mismo valor alcanzado al final del primer día. En los días restantes, la ω a la salida oscila entre los valores de la ω del ambiente y la ω a 0.0 m.

El comportamiento observado en los primeros dos días de la ω a la salida del prototipo es coherente con los resultados observados en la [Figura 5.1](#) ya que en los primeros dos días de secado se logró la reducción de más de la mitad de la humedad inicial del lecho de cacao. Esto último, podría explicar el aumento por un factor de 2.5 de la ω a la salida del prototipo en comparación con la ω ambiental. Finalmente, el comportamiento de la ω a la salida del prototipo de los últimos tres días, evidencia que el grano aún aporta humedad al aire pero en menor cantidad en comparación con los primeros dos días.

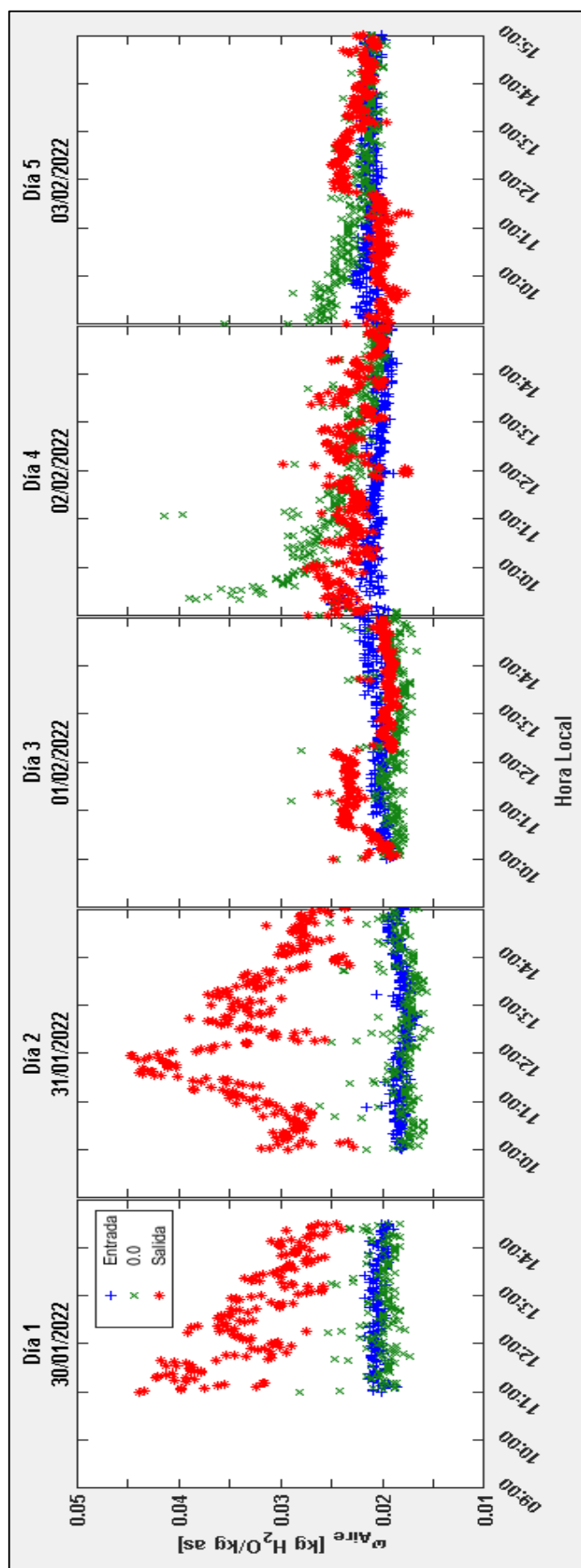


Figura 5.4 Humedad absoluta del aire como función de la hora local, para los cinco días de secado.

Discusión de la Asociación entre el Comportamiento de las Propiedades del Aire y del Grano con la Irradiancia

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, la razón largo/ancho permite asemejar el modelo de flujo desecante a un flujo pistón. Sin embargo, Salvatierra-Rojas et al. (2021), quienes realizaron experimentos y simulaciones de un secador similar al SBD 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 monográfico 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 5.3](#)), pero sin suficiente intercambio de masa para ser percibida por el sensor a 0.0 m (gráficas de la [Figura 5.4](#)).

En los primeros dos días la radiación solar contribuye a la evaporación de cerca del 55% de la humedad inicial del grano ([Figura 5.2](#)). El agua evaporada desde el sólido hacia el aire (gráficas de la [Figura 5.4](#)), contribuye al aumento de la temperatura del aire a la salida del prototipo de secador (gráficas intermedias de la [Figura 5.3](#)), mientras que la temperatura del grano no varía apreciablemente (gráficas inferiores de la [Figura 5.1](#)).

Por su parte, en los últimos tres días la transferencia de humedad del cacao al aire se verifica a menor velocidad (gráficas de la [Figura 5.4](#)). A diferencia de los días previos, la radiación solar contribuye en mayor medida a aumentar la temperatura del sólido (gráficas inferiores de la [Figura 5.1](#)). 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 prototipo de secador (gráficas intermedias de la [Figura 5.3](#)).

5.2.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL PROTOTIPO

Tal como se detalló en el [acápite 4.2.2](#) de la metodología, se determinó la eficiencia energética promedio del prototipo de secador para cada día de exposición solar. Se determinó la eficiencia energética considerando la energía consumida por el ventilador, $\eta_{dia,con}$, empleando la [ecuación 4.3](#). Por su parte, la eficiencia energética sin considerar la energía consumida por el ventilador, $\eta_{dia,sin}$, aplicando la [ecuación 4.4](#).

La cantidad de agua evaporada por cada día se determinó de acuerdo a la [ecuación 4.7](#) y los resultados se presentan en la [Tabla G.1](#). En dicha tabla también se presentan tanto las masas de las muestras por día, así como la masa de la broza retirada del prototipo. La temperatura promedio del sólido por cada día, $\bar{T}_{sol,dia}$, se calculó con los datos de temperatura del grano que se encuentran en la [Anexo Digital G](#). Seguidamente, con dicha temperatura promedio se calculó el calor latente de vaporización, λ_v . Los valores de $\bar{T}_{sol,dia}$ y λ_v se presentan en la [Tabla G.2](#).

Finalmente, tanto la energía utilizada por día para evaporar la humedad del material, $E_{ev,dia}$, así como la energía solar suministrada por día al secador, $E_{s,dia}$, se calcularon de acuerdo a lo descrito en el [acápite 4.2.2](#) de la metodología. Los valores de $E_{ev,dia}$, $E_{s,dia}$, $E_{f,dia}$ y $E_{T,dia}$ se presentan en la [Tabla G.2](#).

En la [Tabla 5.2](#) 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, 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 5.2 Eficiencia energética promedio diaria del prototipo de secador con y sin considerar el ventilador.

Día	Horas de exposición solar [h]	$\bar{X}_{principio}$ [kg H ₂ O/kg ss]	$\bar{X}_{final}$ [kg H ₂ 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 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).

5.2.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CACAO

Tal como se detalló en el [acápito 4.2.3](#), 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 ([Anexo H](#)). El cacao proporcionado al catador, corresponde al cacao procesado en el prototipo durante la evaluación del desempeño térmico del prototipo 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).

Dentro de los parámetros físicos evaluados se encuentra la humedad, el peso de la muestra de 100 granos, así como el análisis de prueba de corte.

En cuanto a la humedad del cacao proporcionado al catador, esta presentó un valor de 7.8% bh; 0.4 puntos porcentuales por encima al obtenido durante la evaluación del desempeño térmico del prototipo en la UNI. Tal como se señaló en el [acápito 3.4.1](#), esta humedad se encuentra por debajo del máximo de 8% (bh) recomendado por la mayoría de la literatura (End & Dand, 2015; Arvelo et al., 2017; IPADE, 2010; Reyes & Capriles de Reyes, 2000).

De acuerdo al reporte, 100 granos de cacao pesaron 137 g; por tanto, el peso promedio de un grano sería de 1.37 g. Según la clasificación para tamaño de grano colombiano de Fedecacao (2016), el índice del grano sería bajo ya que su valor es menor de 1.4 g.

Adicionalmente, se aplicó el procedimiento indicado en ISO (2017) para la determinación del recuento de granos. Se pesaron 600.81 g de cacao que correspondieron a 450 granos. Al emplear la fórmula D.1 de dicha fuente, se obtuvo un recuento de granos de 74.9 con lo cual este cacao correspondería a la clasificación de granos de tamaño estándar.

Adicionalmente, se construyó la [Tabla 5.3](#) en analogía con la tabla 1 de la ISO 2451:2017 (ISO, 2017), en la cual se clasifica 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 5.3](#) se muestran los resultados del reporte físico de los granos de cacao procesado en este trabajo.

Tabla 5.3 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, el cacao obtenido en este trabajo monográfico se clasifica como cacao de Grado 1. Desde el punto de vista de seguridad alimentaria ([acápite 3.6.4](#)), 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 de la productora Eufemia Woo tuvo un adecuado proceso fermentativo (End & Dand, 2015).

Finalmente, se construyó la [Tabla 5.4](#) 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 prototipo de secador es una mezcla de distintos clones ([acápite 5.2.1](#)), al cumplir con cuatro de los siete parámetros, este se clasificaría como cacao tipo B.

Tabla 5.4 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]	≥ 1.05	1.37
Humedad mínima [% bh]	6.5-7	7.8
Granos bien fermentados [%]	≥ 75	80
Granos con moho interno [%]	≤ 3	2
Grano violeta o morado [%]	≤ 8	4
Grano pizarroso sin fermentar [%]	≤ 1	2
Grano perforado o pegado [%]	≤ 1	3

VI CONCLUSIONES

El presente trabajo monográfico fue desarrollado como parte del convenio de colaboración entre la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, INTA.

Un equipo de trabajo interdisciplinario con estudiantes-tesistas y docentes-tutores de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Agrícola e Ingeniería Química; diseñó un prototipo de secador solar inflable de bolsa destinado al secado de cacao recién fermentado. Esta innovación se construyó con materiales disponibles en el mercado local y su costo de construcción total fue de C\$ 63,784.

Este prototipo 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 m² en la cual caben 177 kg de cacao recién fermentado.

Como resultado de la verificación del funcionamiento del prototipo, realizada en la finca Tininiska, Waslala, Región Autónoma del Caribe Norte; se redujo en tres días la humedad de 13.6 kg de cacao recién fermentado desde 32% bh hasta 14.2% bh, contra un 26% bh con el secado tradicional en marquesinas.

Durante la evaluación del prototipo, 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 prototipo de 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.

En este trabajo monográfico se comprobó que el cacao recién fermentado puede ser secado satisfactoriamente en un secador solar inflable de bolsa. El prototipo de secador construido es una herramienta de gran utilidad para establecer los protocolos de secado de las distintas variedades de cacao; así como de otros productos agrícolas, tales como granos básicos. Además, este prototipo servirá de referente para futuras evaluaciones y por tanto para el diseño de secadores para cada producto específico.

VII RECOMENDACIONES

Dado a los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda realizar experimentos con el prototipo de secador para: (1) evaluarlo con su carga máxima procesando distintas variedades de cacao recién fermentado, tanto en modo directo como híbrido; (2) realizar pruebas de desempeño del equipo en distintas zonas productoras del país y en las dos estaciones del año; (3) determinar la influencia del presecado tanto en la eficiencia del secador como en la calidad del cacao obtenido; (4) estudiar el comportamiento fluidodinámico del aire desecante dentro del equipo, variando su velocidad de entrada; (5) realizar los puntos 1 y 2 con otros productos agrícolas, tales como: maíz, arroz, sorgo, frijol y café.

Este tipo de secador puede operar eficientemente a la intemperie. Sin embargo, en condiciones de lluvia se recomienda ubicarlo en un área acondicionada con techo translúcido o preferiblemente transparente. Además, dicha área debería estar lo suficientemente ventilada para evitar la acumulación del ácido acético emanado del lecho en los primeros tres días. Esto último evitaría comprometer la salud del personal.

Se identificó una opción de mejora en el diseño del prototipo de secador, la cual consiste en colocar el grano sobre bandejas perforadas, tal como hicieron Romuli et al. (2019); Hung, et al. (2020); y Armah, Akowuah, Obeng-Akrofi, & McNeill (2021). De esta manera se evita la acumulación de agua entre el grano y el fondo del equipo, observada en los primeros dos días de secado. Además, según estos autores el tiempo de secado se reduce y se incrementa la eficiencia energética del equipo.

A futuro, una versión comercial de este equipo podría tener un costo menor al del prototipo ya que no requeriría todos los sensores, salvo aquellos necesarios para controlar la resistencia. Además, el panel de control sería menos complejo pues no se requiere la adquisición de datos.

Finalmente, también se puede contemplar una versión del secador que funcione con energía eléctrica, para prescindir del panel solar y la batería. Con esto se reduciría tanto el costo como el peso del equipo, ya que el conjunto batería-panel comprende casi el 28% de los costos y el 72% del peso total del prototipo desarrollado en esta investigación.

VIII NOMENCLATURA

A_1	Área del sector circular	m^2
A_2	Área del triángulo	m^2
A_{lecho}	Área de lecho de cacao	m^2
$A_{anemometro}$	Área de sección transversal del anemómetro	m^2
$A_{transversal}$	Área transversal al flujo de aire dentro del prototipo	m^2
bh	Base húmeda	$kg\ H_2O/(kg\ H_2O+kg\ ss)$
bs	Base seca	$kg\ H_2O/kg\ ss$
$d_{anemometro}$	Diámetro del anemómetro	m
e_{lecho}	Espesor del lecho de cacao en el prototipo	cm
E_{ev}	Energía utilizada para evaporar la humedad	MJ
E_T	Energía total suministrada al prototipo	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_{arco}	Longitud del arco	m
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
$P_{prototipo}$	Contorno del prototipo	m
$\dot{Q}_{aire}$	Caudal del aire por área de lecho	$m^3/min\cdot m^2$
r_{arco}	Radio del arco	m
ss	Masa de sólido seco	kg
sp	Semiperímetro del triángulo	m
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	$^{\circ}C$
v_{aire}	Velocidad promedio del aire dentro del prototipo	m/s
$v_{anemometro}$	Velocidad del aire a través del anemómetro	m/s
$W_{cubierta}$	Ancho de la cubierta del prototipo	m
W_{fondo}	Ancho del fondo del prototipo	m
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

α	Ángulo superior del triángulo	deg
$\eta_{dia,con}$	Eficiencia energética considerando ventilador	%
$\eta_{dia,sin}$	Eficiencia energética sin considerar ventilador	%
λ_v	Calor latente de vaporización del agua	kJ/kg
ω	Humedad absoluta del aire desecante	kg H ₂ O/kg as

XI BIBLIOGRAFÍA

- Agamez, J. A. (2020). *Diseño de un Secador Convectivo para el Secado del Grano de Cacao*. Tesis, Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medellín.
- Akmel, D. C., Kakou, K. E., Koné, K. Y., Assidjo, N. E., & Kouamé, P. (2015). Desorption isotherms and isotheric heats of fermented cocoa beans (*Theobroma cocoa*). *Journal of Food Research*, 4(3), 138-147. doi:10.5539/jfr.v4n3p138
- 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
- Armah, K., Akowuah, J., Obeng-Akrofi, G., & McNeill, S. (2021). Application of Analytic Hierarchy Process in Selection of an Appropriate Drying Platform for Maize Drying in a Solar Bubble Dryer. *Open Journal of Applied Sciences*(11), 157-175. doi:10.4236/ojapps.2021.111011
- 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.
- Ayestas, E., Vega-Jarquin, C., Torres, P., Lanzas, J., Orozco, L., & Astorga, C. (2014). Puntos críticos del manejo poscosecha de cacao en Waslala, Nicaragua. *La Calera*, 8.
- Badgujar, V. (2012). An experimental investigation of solar dryer with regenerative desiccant material for multicrops. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 3144-3149.
- Banout, J. (2017). Solar Drying Systems. In O. Prakash, & A. Kumar, *Solar Drying Technology* (pp. 39-67). Singapore: Springer Nature. doi:10.1007/978-981-10-3833-4
- 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.
- Barreiro, J. A., & Sandoval, A. J. (2020). Kinetics of moisture adsorption during simulated storage of whole dry cocoa beans at various relative humidities. *Journal of Food Engineering*, 273, 8.
- 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.
- Boquet, R., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 13, 319-327. doi:10.1111/j.1365-2621.1978.tb00809.x
- Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, 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

- Caballero, J. A. (2015). *Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2T/día*. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima.
- Castillo Ponce, S. L., & Sáenz Ortega, Y. I. (2011). *Control de calidad en el procesamiento del cacao en la Cooperativa La Campesina en el municipio de Matiguás, año 2011*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad Regional Multidisciplinaria Matagalpa, Matagalpa.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications* (Sixth ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2021). *Numerical Methods for Engineers* (Eighth ed.). Michigan: McGraw-Hill Education.
- 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.
- Collazos-Escobar, G. A., Gutiérrez-Guzmán, N., Váquiro-Herrera, H. A., & Amorcho-Cruz, C. M. (2020). Water dynamics adsorption properties of dried and roasted cocoa beans (*theobroma cacao* L.). *International Journal of Food Properties*, 23(1), 434-444. doi:10.1080/10942912.2020.1732408
- 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.
- Cubillo, A. A. (1998). Estudio preliminar para la recuperación de solventes en la producción del insecticida de nim. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- De Vuyst, L., & Wekx, S. (2015). The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *Journal Applied Microbiology*.
- Deus, V. L., Cerqueira E Silva, M. B., Maciel, L. F., Miranda, L. C., Hirooka, E. Y., Soares, S. E., . . . Bispo, E. d. (2018). Influence of drying methods on cocoa (*Theobroma cacao* L.): antioxidant activity and presence of ochratoxin A. *Food Science and Technology*, 38(1), 278-285. doi:10.1590/fst.09917
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Dutta, P. P., & Kumar, A. (2017). Development and Performance Study of Solar Air Heater for Solar Drying Applications. In O. Prakash, & A. Kumar, *Solar Drying Technology* (pp. 579-610). Singapore: Springer Nature. doi:10.1007/978-981-10-3833-4_21
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*(40), 615-655.
- El Nuevo Diario. (2018, Abril 13). <https://www.elnuevodiario.com.ni>. Retrieved from <https://www.elnuevodiario.com.ni/economia/460967-nicaragua-planea-aplicar-trazabilidad-cacao/>
- End, M., & Dand, R. (2015). CAOBISCO/ECA/FCC Cocoa Beans: Chocolate and cocoa industry quality requirements.

- Flores, N. A. (2018). *Evaluación de la Eficiencia Térmica de un Colector Solar de Tubos Evacuados para Aire de Secado*. Tesis, Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Sonora.
- Fréguin-Gresh, S. (2017). Agroecología y agricultura orgánica en Nicaragua. Génesis, institucionalización y desafíos. Editora Evangraf Ltda.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1-30.
- García, P. J., Rincon, S. L., & Cuervo, S. P. (2016). Implementación del secador solar de túnel tipo Hohenheim en productos agrícolas: Revisión de literatura. *PUENTE Revista Científica*, 10(1), 7-19.
- Gonzales, S., & Alejos, J. (2021). *Sistema de Control Electrónico para un Secador Solar de Cacao Enfocado a Pequeños y Medianos Productores de Nicaragua*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Electrotecnia y Computación, Managua.
- GrainPro. (2021). Retrieved from [https://www.grainpro.com/hubfs/2021/downloadables/SP4052MSD0815-2%20Grainpro%20Bubble%20Dryer%20\(SBD\)%20Flyer.pdf](https://www.grainpro.com/hubfs/2021/downloadables/SP4052MSD0815-2%20Grainpro%20Bubble%20Dryer%20(SBD)%20Flyer.pdf)
- Gutiérrez, J. B. (2000). *Ciencia bromotológica*. España: Díaz de Santos S.A.
- Herman, C., Spreutels, L., Turomzsa, N., Konagano, E. M., & Haut, B. (2018). Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling. *Food and Bioproducts Processing*, 108, 81-94. doi:10.1016/j.fbp.2018.01.002
- Hill, C., Law, C., & Cloke, M. (2008). Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa. *Journal of Engineering Science and Technology*, 10.
- Hill, J. E., & Kusada, T. (1974). *Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance*. National Bureau of Standards, Department of Commerce. Washington: National Science Foundation.
- Hung, N., Fuertes, L., Balingbing, C., Roxas, A., Tala, M., & Gummert, M. (2020). Development and Performance Investigation of an Inflatable Solar Drying Technology for Oyster Mushroom. *Energies*(4122), 13. doi:10.3390/en13164122
- Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1982). *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*. New York, United States of America: Food Science and Technology.
- Imre, L. (2007). Solar drying. In A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying* (Third ed., pp. 307-362). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- 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 postcosecha del cacao. 40. Managua, Nicaragua.
- ISO. (2017). ISO 2451. *Cocoa Beans*, 27. USA.
- Johnson, J. M., Bonilla, J. C., & Aguero, L. (2010). Manual de manejo y producción del cacaotero. 40. León, Nicaragua.
- Kakou, K. E., Akmel, D. C., Abouo, N. V., Assidjo, N. E., & Niamké, L. S. (2015). Isotherme d'adsorption d'eau des fèves de cacao (*Theobroma cacao* L.) marchand. *European Scientific Journal*, 11(12), 355-370.

- Koua, B. K., Koffi, P. E., & Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 72-82. doi:10.1016/j.jssas.2017.01.002.
- Koua, B. K., Koffi, P. M., & Gbaha, P. (2016). Moisture desorption isotherms characteristics of cocoa beans. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 26(3), 143-152.
- Koyuncu, T. (2006). Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*(31), 1073–1088.
- Kudra, T. (2009). Energy Aspects in Food Dehydration. In C. Ratti, & C. Ratti (Ed.), *Advances in Food Dehydration* (pp. 423-445). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Kudra, T. (2014). Energy Aspects in Drying. *Drying Technology*, 22(5), 917-932. doi:10.1081/DRT-120038572
- La Prensa. (2016, 12 17). Hay calidad pero hace falta. p. 7.
- 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, E. C. (2011). *Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar - gas)*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Oaxaca.
- 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.
- Ludeña, A. L. (1990). *Secado del Culantro (Coriandrum sativum) por Secado Solar, Tunnel o Aire Caliente y Liofilización*. Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Industrias Alimentarias, Lima.
- 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.
- MacManus Chinenye, N., Ogunlowo, A. S., & Olukunle, O. J. (2010). Cocoa bean (Theobroma cacao L.) drying kinetics. *Chilean journal of agricultural research*, 70(4), 633-639.
- Mahecha Rojas, R. E. (2015). Efectos del secado y almacenaje sobre la calidad del cacao. *Colombia Cacaotera*, 4.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Seventh ed.). México, D.F: The McGraw-Hill.
- Mealla-Sánchez, L. E., & Morales-Olaciregui, J. D. (2018). Evaluación del comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo. *TecnoLógicas*, 21(41), 22-44.
- MEFCCA & Cooperación Suiza en América Central. (2017). Mejoramiento de las capacidades PROCACAO. Nicaragua. Retrieved from 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>
- Mujaffar, S., Sukha, D., & Ramroop, A. (2017). Comparison of the drying behavior of fermented cocoa (*Theobroma cacao* L.) beans dried in a cocoa house, greenhouse and mechanical oven. 1-7. Trinidad and Tobago.
- Ndukwu, M. C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. IX, 7. Abia State, Nigeria.
- Nogales, J., Graziani, L., & Ortiz, L. (2006). Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseño de cajones de madera. *Agronomía Tropical*, 12.
- Nonhebel, G., & Moss, A. A. (2002). *El secado de sólidos en la industria química*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Norton, B. (2017). Characteristics of Different Systems for the Solar Drying of Crops. In O. Prakash, & A. Kumar, *Solar Drying Technology* (pp. 69-88). Singapore: Springer Nature. doi:10.1007/978-981-10-3833-4
- Oliveira, G. H., Corrêa, P. C., Santos, E. S., Treto, P. C., & Diniz, M. D. (2011). Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. *International Journal of Food Science and Technology*(46), 2077-2084.
- Pastorelly, D. (2013). *El cacaotero portal informativo*. Retrieved from http://www.elcacaotero.com.ec/bioquimica_y_microbiologia_fermentacion_cacao.html
- Patil, R., & Gawande, R. (2016). A review on solar tunnel greenhouse drying system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 196-214.
- Pérez, M. A., & Contreras, J. D. (2017). Instructivo de buenas prácticas de cosecha y poscosecha. 60. Bogota D. C.: Swisscontact Colombia.
- Porras, J. S. (2013). *Diseño, construcción y caracterización experimental de un secador solar de tunel tipo Hohenheim de convección forzada*. Tesis, Universidad de los Andes, Departamento Ingeniería Mecánica, Bogotá.
- 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>
- ProDeSoC. (2006). Guia técnica para promotores agroforestales. 66. Managua, Nicaragua.
- Pugh, T., & Vivas, J. (2016). Manejo Agroecológico del cacao. Manejo post cosecha. 44. Nicaragua.
- Reyes, H., & Capriles de Reyes, L. (2000). *El cacao en venezuela-Moderna tecnología para su cultivo*. Caracas, Venezuela: Chocolates El Rey, C.A.
- Romuli, S., Schock, S., Nagle, M., Kiria, C., & Müller, J. (2019). Technical Performance of an Inflatable Solar Dryer for Drying Amaranth Leaves in Kenya. *Applied Sciences*, 9(3431), 11. doi:10.3390/app9163431

- 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
- Sandy, X., Reza, C., Espinoza, J., & Arellano, G. (2015). Control de fermentado y evaluación de un prototipo de secador con ambiente controlado para cacao nacional. 40. Bolivia: Wildlife Conservation Society (WCS).
- Shelton, B. (1967). Artificial drying of cocoa beans. *Trop. Agric.*, 125.
- Siguencia, J. M. (2013). *Evaluación de un Secador Solar Inclinado con Absorbedor de Zeolita para Granos de Cacao CCN51*. Tesis, Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas, Cuenca.
- 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., & Kundra, T. (1930). *Drying: principles, applications and desing*. New York: Gordon and Breach Science Publisher.
- Tinoco, H. A., & Ospina, D. Y. (2010). Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. *Revista EIA*, 13(5), 53-63. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=149213727004>
- Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa* (Second ed.). Guatemala: McGRAW-HILL.
- Valdivia Arrunátegui, R. (2013). Fundamentos del secado del cacao. 48.
- Valencia, M. I. (2014). *Diseño, Construcción y Evaluación de un Prototipo de Secador Solar para el Proceso de Secado de Tomate*. Tesis, Universidad Nacional Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Xalapa.
- VALYCONTROL, S.A DE C.V. (2008, 10 27). <https://www.trazar.com.pa/technical/cfc/libro%20de%20refrigeracion.pdf>. Retrieved 05 20, 2019, from <https://www.trazar.com.pa/technical/cfc/libro%20de%20refrigeracion.pdf>
- Vásquez, G. (2017, Octubre). *Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao*. Tesis, Universidad de Piura, Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Piura.
- 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
- Wan-Daud, W. R., Meor-Talib, M. Z., & Ibrahim, M. H. (1996). Characteristic drying curves of cocoa beans. *Drying Technology*, 11.
- Wood, G. R., & Lass, R. A. (1985). *Cocoa* (Fourth ed.). Oxford: Blackwell Science Ltd.

X ANEXOS

Anexo A

Plano, tabla de materiales y fotografías del prototipo de secador.

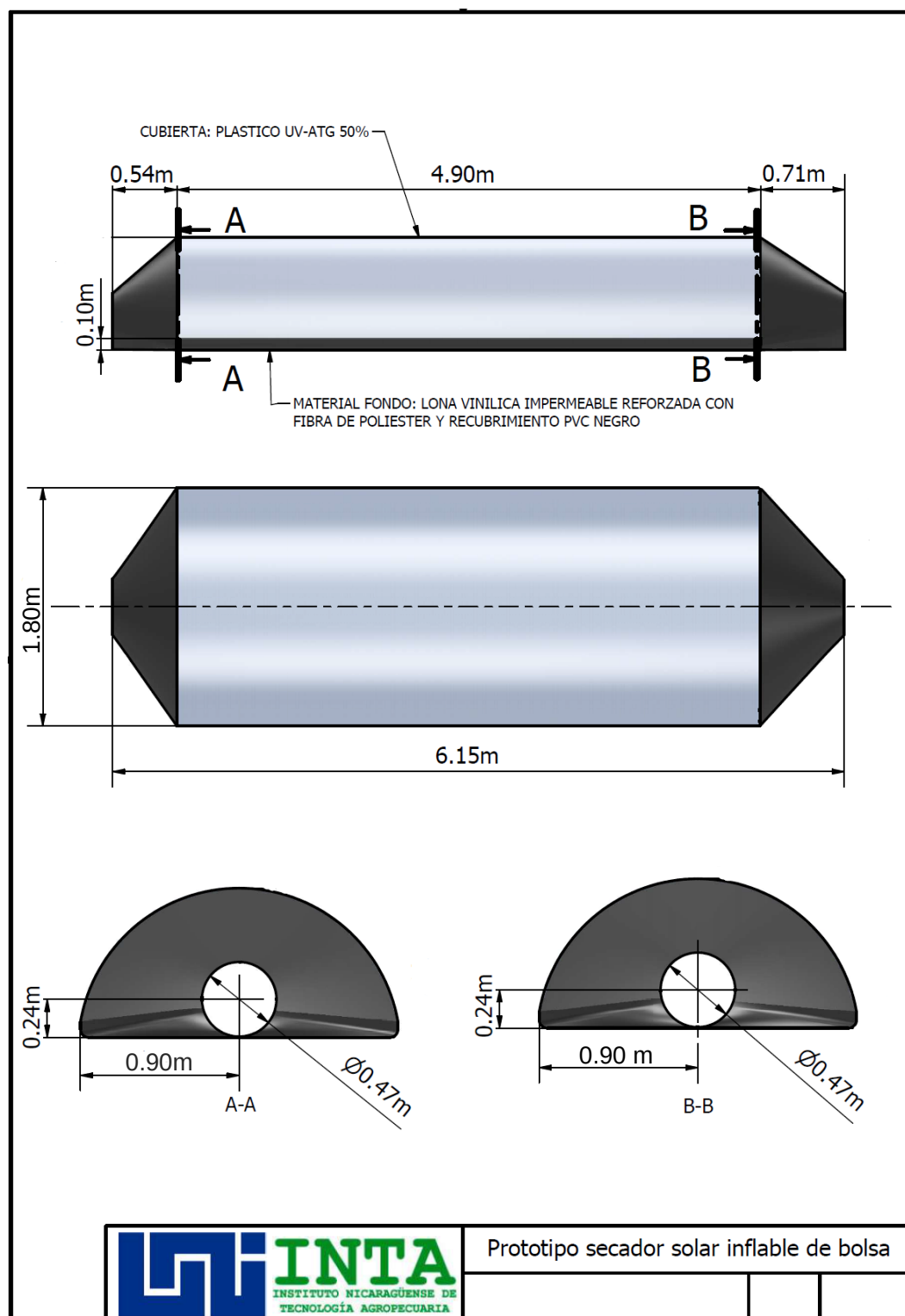


Figura A.1 Plano del prototipo de secador inflable de bolsa.

Evaluación de un prototipo de secador solar inflable de bolsa para el secado de cacao

Tabla A.1 Resumen de dimensiones y lista de materiales y elementos electrónicos del prototipo de secador.

Descripción	Especificaciones
Longitud x Ancho	6.15 m x 2.00 m
Área de secado	4.90 m x 1.80 m de lona vinílica impermeable reforzado con fibra de poliéster y con recubrimiento de PVC, color negro
Área de Cubierta	4.90 m x 1.48 m de Plástico-UV de invernadero, 50% blanco
1 Maletín	0.85m x 0.85m x 0.15m
Cremallera	Zipper de alta resistencia
1 Entrada del aire	0.47 m de diámetro
1 Salida del aire	0.47 cm de diámetro
*Capacidad	177 kg de producto fresco, 20kg/m ²
1 Ventilador	DC, 12V, 80W, 2.5A, diámetro 25 cm
1 Panel solar	100W
1 Batería solar	12V, 70Ah
1 Controlador de carga	Modelo SM2430, DC, 12-24V, 20A
3 Sensores DHT11 para la humedad y temperatura del aire	Rango de temperatura de 0-70°C, precisión $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$. Rango de humedad relativa de 20-90%, precisión 5%
1 Sensor AM2315 para la humedad y temperatura del aire	Rango de temperatura de -20-80°C, precisión $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Rango de humedad relativa de 0-100%, precisión 2%
4 Sensores tipo K para temperatura del grano	Rango de medición de -20-85°C, precisión $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
1 Sensor de radiación solar	IR (550-1000 nm) y LV (400-800 nm)
1 Visualizador de datos	LCD 16cm x 2cm
1 Módulo de lectura y escritura de datos	Módulo SD y salida de datos TXT
1 Resistencia eléctrica	DC, 12-24V, 200W
1 Alarma sonora	DC, 105dB, 12V
1 Estructura metálica	Tubos rectangulares de aluminio

*Capacidad establecida por la contraparte del INTA.



Figura A.2 Vista interna del prototipo de secador solar sin carga.



Figura A.3 Vista externa del prototipo de secador solar donde se aprecian sus tres secciones.



(a)



(b)

Figura A.4 Medición de las dos secciones cónicas del secador: entrada (a) y salida (b).



Figura A.5 Medición de los laterales de las secciones cónicas.



Figura A.6 Medición del largo del área de secado del prototipo de secador solar (a).



Figura A.7 Medición del largo del área de secado del prototipo de secador solar (b).



Figura A.8 Medición del ancho del área de secado del prototipo de secador solar.



Figura A.9 Medición del ancho de la cubierta del prototipo de secador.



Figura A.10 Medición del ancho de la cubierta del prototipo de secador.

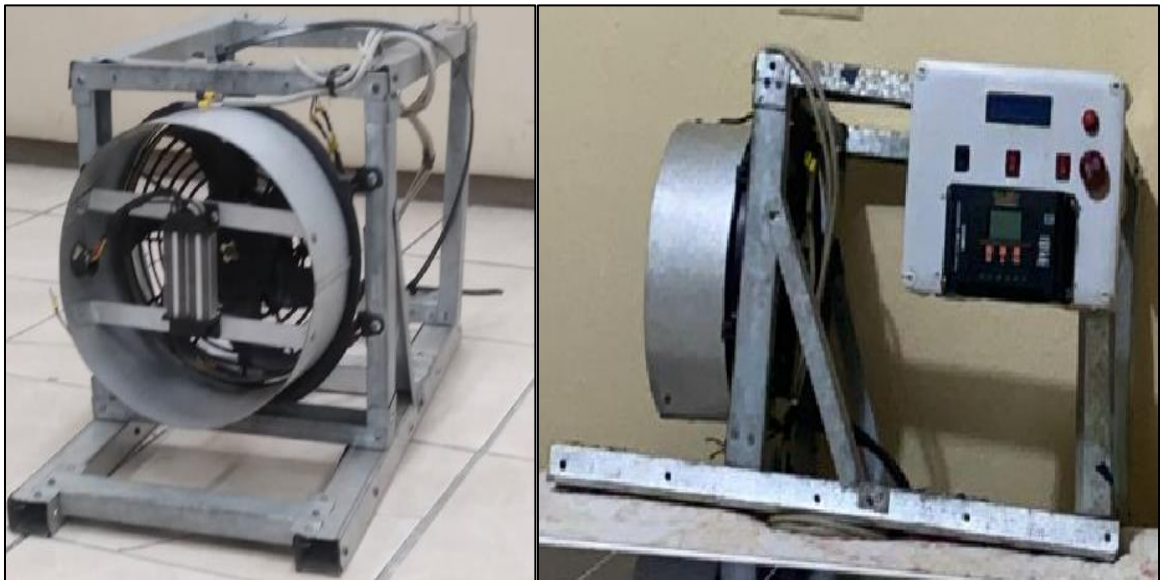


Figura A.11 Estructura metálica construida con tubos rectangulares de aluminio. En dicha estructura esta acoplado tanto el panel de control como el ventilador.



(a)

(b)

Figura A.12 (a) Medición de la masa del prototipo de secador y (b) del maletín con el prototipo de secador en su interior.



(a)

(b)

Figura A.13 (a) Medición de la masa de la estructura metálica y (b) de la batería.

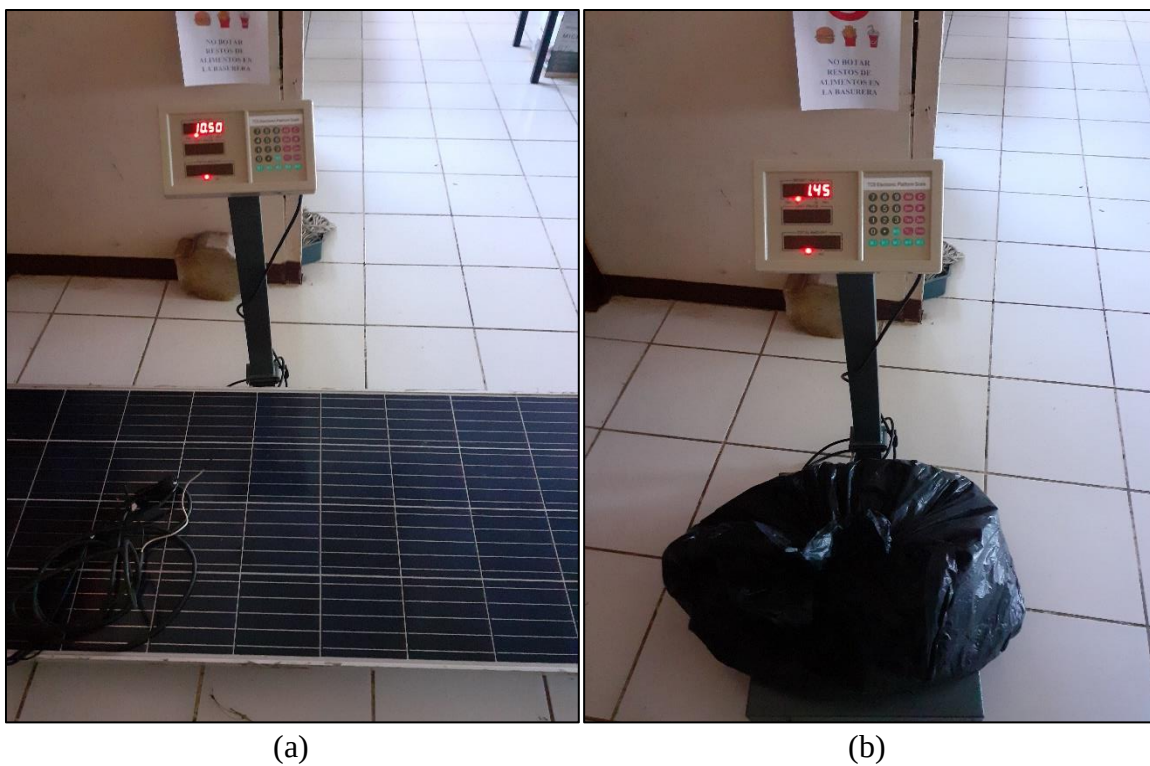


Figura A.14 (a) Medición de la masa del panel solar y (b) de los sensores.

Anexo B

Fotografías de la visita a la finca Tininiska en Waslala.



Figura B.1 Distintas variedades de cacao que se cultiva en la finca Tininiska.



Figura B.2 Ubicación del prototipo de secador en la finca Tininiska.

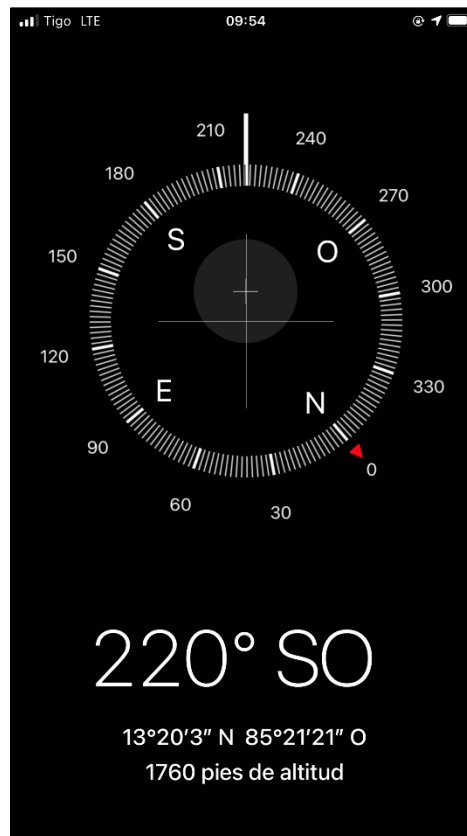


Figura B.3 Orientación geográfica del prototipo de secador en la ubicación acordada con la propietaria de la finca Tininiska.



Figura B.4 Medición de la masa de cacao recién fermentado proporcionado por la propietaria de la finca Tininiska.



Figura B.5 Secado tradicional en marquesinas llevado a cabo en la finca Tininiska.



Figura B.6 Continuación del secado del cacao proporcionado en la finca Tininiska en el área de secado de la misma finca.



Figura B.7 Continuación del proceso de secado de cacao en las instalaciones del Centro Nicaragüense de Investigación Agropecuaria, CNIA.

Anexo C

Fotografías de la evaluación del desempeño térmico del prototipo de secador en la UNI.

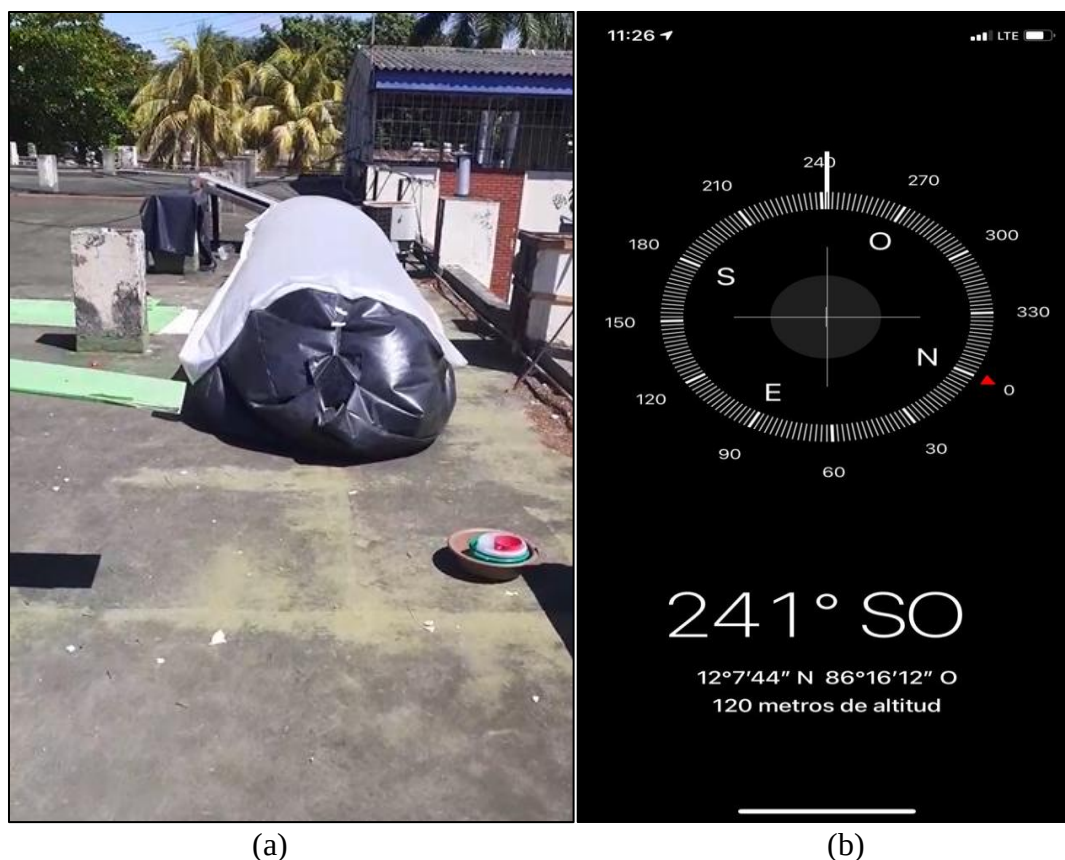


Figura C.1 (a) Ubicación y (b) orientación del prototipo de secador solar en el edificio 02 del Recinto Universitario Simón Bolívar, RUSB.



Figura C.2 Masa de cacao recién fermentado proveniente de la finca Tininiska.



Figura C.3 Masa final de cacao seco al finalizar el quinto día de exposición solar.



Figura C.4 Lecho de cacao cubriendo un total de 3m² del área útil de secado.



Figura C.5 Espesor del lecho de los granos de cacao de 3 cm.



Figura C.6 Sensor de propiedades del aire ubicado externamente a la entrada.



Figura C.7 Sensor de temperatura del aire ubicado a 0.0 m de la entrada. Dentro del lecho de granos se encuentra el sensor de temperatura de grano a 0.0 m.



Figura C.8 Sensor de temperatura del grano a 1 m y sensor de propiedades del aire a 1.5 m



Figura C.9 Sensor de propiedades del aire a la salida y detrás el cableado del sensor de temperatura del grano a 3.0 m



Figura C.10 Muestras 7 granos de cacao recolectadas en cada zona de muestreo cada media hora.



Figura C.11 Muestras de cacao para determinar la humedad del lecho empleando el método al horno de la norma internacional ISO-2451:2017.



Figura C.12 Película de humedad en el fondo de prototipo de secador observada al finalizar el período de exposición solar en el primer y segundo día de secado.



Figura C.13 Amontonamiento de los granos de cacao al finalizar cada período de exposición solar para luego ser guardados en sacos.



Figura C.14 Guardado de los granos de cacao al finalizar cada los períodos de exposición solar.



Figura C.15 Medición de la masa de cacao al finalizar los períodos de exposición solar empleando una báscula electrónica.



Figura C.16 (a) Medición de la irradiancia cada 3 minutos durante los períodos de exposición solar.



Figura C.17 (b) Medición de la irradiancia cada 3 minutos durante los períodos de exposición solar.



Figura C.18 Restos de placenta que quedaba en el fondo del prototipo de secador.



Figura C.19 Restos de placenta recolectados en una bolsa retirada de la masa de cacao.



Figura C.20 Temperatura del cacao antes de su almacenamiento.

Anexo D

Tabla de humedad en base seca del lecho de granos de cacao.

Evaluación de un prototipo de secador solar inflable de bolsa para el secado de cacao

Tabla D.1 (Inicio) Humedad en base seca del lecho de cacao para los cinco días de exposición solar obtenidas empleando el método al horno de la norma ISO 2451:2017.

Día	Hora local	Horas acumuladas de exposición solar	Humedad en Base Seca del Cacao, X [kg H ₂ O/kg ss], para cada zona de muestreo			Humedad promedio
			1	2	3	$\bar{X}$
1 30/01/2022	11:00	0.0	1.00	1.00	1.00	1.00
	11:30	0.5	0.72	0.78	0.86	0.79
	12:00	1.0	0.77	0.93	0.66	0.79
	12:30	1.5	0.82	0.80	0.77	0.80
	13:00	2.0	0.69	0.81	0.88	0.79
	13:30	2.5	0.65	0.91	0.75	0.77
	14:00	3.0	0.81	0.78	0.68	0.75
	14:30	3.5	0.70	0.80	0.84	0.78
2 31/01/2022	10:00	3.5	0.64	0.64	0.64	0.64
	10:30	4.0	0.71	0.61	0.54	0.62
	11:00	4.5	0.70	0.53	0.67	0.63
	11:30	5.0	0.60	0.58	0.57	0.58
	12:00	5.5	0.61	0.59	0.58	0.59
	12:30	6.0	0.58	0.61	0.55	0.58
	13:00	6.5	0.56	0.58	0.62	0.59
	13:30	7.0	0.68	0.52	0.56	0.59
	14:00	7.5	0.50	0.47	0.47	0.48
	14:30	8.0	0.52	0.49	0.53	0.51
	15:00	8.5	0.46	0.49	0.46	0.47
3 01/02/2022	10:00	8.5	0.40	0.40	0.40	0.40
	10:30	9.0	0.37	0.45	0.39	0.40
	11:00	9.5	0.31	0.31	0.36	0.33
	11:30	10.0	0.35	0.38	0.41	0.38
	12:00	10.5	0.28	0.31	0.39	0.33
	12:30	11.0	0.32	0.31	0.31	0.31
	13:00	11.5	0.28	0.40	0.36	0.35
	13:30	12.0	0.24	0.32	0.36	0.30
	14:00	12.5	0.25	0.30	0.31	0.29
	14:30	13.0	0.20	0.28	0.30	0.26
	15:00	13.5	0.22	0.30	0.26	0.26

Evaluación de un prototipo de secador solar inflable de bolsa para el secado de cacao

Tabla D.1 (Conclusión) Humedad en base seca del lecho de cacao para los cinco días de exposición solar obtenidas empleando el método al horno de la norma ISO 2451:2017.

Día	Hora local	Horas acumuladas de exposición solar	Humedad en base seca del cacao, X [kg H ₂ O/kg ss], para cada zona de muestreo			Humedad promedio
			1	2	3	$\bar{X}$
4 02/02/2022	09:00	13.5	0.24	0.24	0.24	0.24
	09:30	14.0	0.22	0.21	0.21	0.21
	10:00	14.5	0.23	0.24	0.21	0.23
	10:30	15.0	0.19	0.20	0.19	0.19
	11:00	15.5	0.19	0.16	0.20	0.18
	11:30	16.0	0.19	0.22	0.17	0.19
	12:00	16.5	0.17	0.18	0.18	0.17
	12:30	17.0	0.17	0.17	0.14	0.16
	13:00	17.5	0.16	0.17	0.19	0.17
	13:30	18.0	0.18	0.15	0.15	0.16
	14:00	18.5	0.13	0.18	0.15	0.15
	14:30	19.0	0.15	0.13	0.12	0.14
	15:00	19.5	0.13	0.13	0.13	0.13
5 03/02/2022	09:00	19.5	0.13	0.13	0.13	0.13
	09:30	20.0	0.11	0.11	0.13	0.12
	10:00	20.5	0.11	0.11	0.11	0.11
	10:30	21.0	0.10	0.10	0.10	0.10
	11:00	21.5	0.10	0.09	0.09	0.09
	11:30	22.0	0.11	0.11	0.11	0.11
	12:00	22.5	0.09	0.09	0.10	0.09
	12:30	23.0	0.08	0.10	0.10	0.09
	13:00	23.5	0.09	0.09	0.10	0.09
	13:30	24.0	0.08	0.09	0.08	0.08
	14:00	24.5	0.09	0.09	0.09	0.09
	14:30	25.0	0.08	0.09	0.09	0.09
	15:00	25.5	0.08	0.08	0.09	0.08

Anexo E

Cálculo de velocidad promedio del aire y de caudal de aire por unidad de área de lecho.

La velocidad promedio del aire, v_{aire} , que fluye dentro del prototipo a través de la sección transversal, $A_{transversal}$, se calculó a partir de la velocidad del aire a través del anemómetro, $v_{anemometro}$, ya discutida en el [acápite 4.1.2](#), así como su área de sección transversal, $A_{anemometro}$:

$$v_{aire} = \frac{v_{anemometro} A_{anemometro}}{A_{transversal}} \quad (E.1)$$

Por su parte, el caudal del aire, $\dot{Q}_{aire}$, por área de lecho se calculó con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{aire} = \frac{v_{aire} A_{transversal}}{A_{lecho}} \quad (E.2)$$

Donde: A_{lecho} es el área del lecho cuyo valor ya ha sido declarado en el [acápite 5.2.2](#).

El área de la sección transversal del anemómetro a través de la cual pasa el aire corresponde al área de un círculo. El diámetro interno del anemómetro, $d_{anemometro}$, es de 7cm; por tanto, su área se calculó como:

$$A_{anemometro} = \frac{\pi d_{anemometro}^2}{4} \quad (E.3)$$

Debido a la naturaleza deformable y variable del prototipo no se puede asegurar con precisión la forma del área transversal al flujo del aire dentro del mismo. En base a la observación durante la evaluación experimental del prototipo de secador, la mayor parte del tiempo esta sección transversal es bastante cercana a la suma de las dos áreas representadas como A_1 y A_2 en la [Figura E.1](#), por tanto:

$$A_{transversal} = A_1 + A_2 \quad (E.4)$$

El área correspondiente a A_1 es un sector circular, mientras que para A_2 es un triángulo. Ambas áreas se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$A_1 = \frac{(360^\circ - \alpha) \pi r_{arco}^2}{360^\circ} \quad (E.5)$$

$$A_2 = \sqrt{sp (sp - r_{arco})^2 (sp - W_{lecho})} \quad (E.6)$$

Donde: α es el ángulo superior del triángulo; r_{arco} es el radio del arco; y W_{lecho} es la longitud mayor del triángulo que corresponde al ancho del lecho, cuyo valor ya ha sido declarado en el [acápite 5.2.2](#).

El semiperímetro del triángulo, sp , es igual a:

$$sp = \frac{W_{lecho} + 2 r_{arco}}{2} \quad (E.7)$$

Por su parte, α y r_{arco} se obtienen con el sistema de dos ecuaciones conformado por la ley del coseno para el triángulo y la ecuación de la longitud del arco, l_{arco} , para el sector circular:

$$W_{lecho}^2 = 2 r_{arco}^2 (1 - \cos \alpha) \quad (E.8)$$

$$l_{arco} = \frac{(360^\circ - \alpha) \pi r_{arco}}{180^\circ} \quad (E.9)$$

La longitud del arco también corresponde a:

$$l_{arco} = P_{prototipo} - W_{lecho} \quad (E.10)$$

Finalmente, el contorno del prototipo, $P_{prototipo}$, es igual a:

$$P_{prototipo} = W_{fondo} + W_{cubierta} \quad (E.11)$$

Donde: W_{fondo} es el ancho del fondo del prototipo y $W_{cubierta}$ es el ancho de la cubierta. Ambos valores ya declarados en la [Tabla 5.1](#).

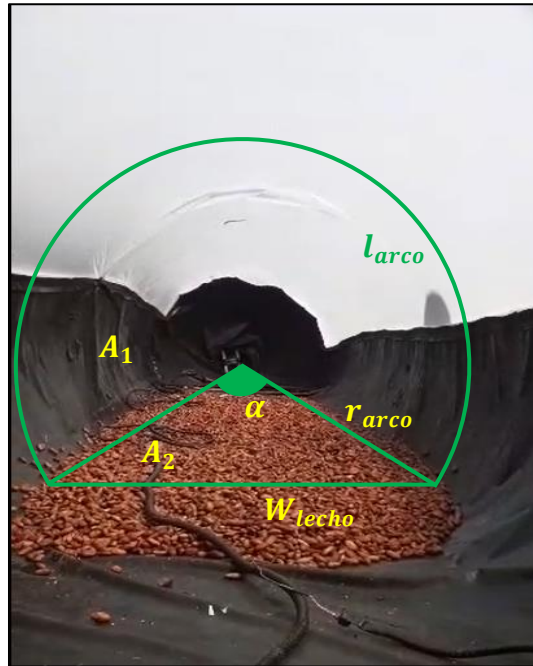
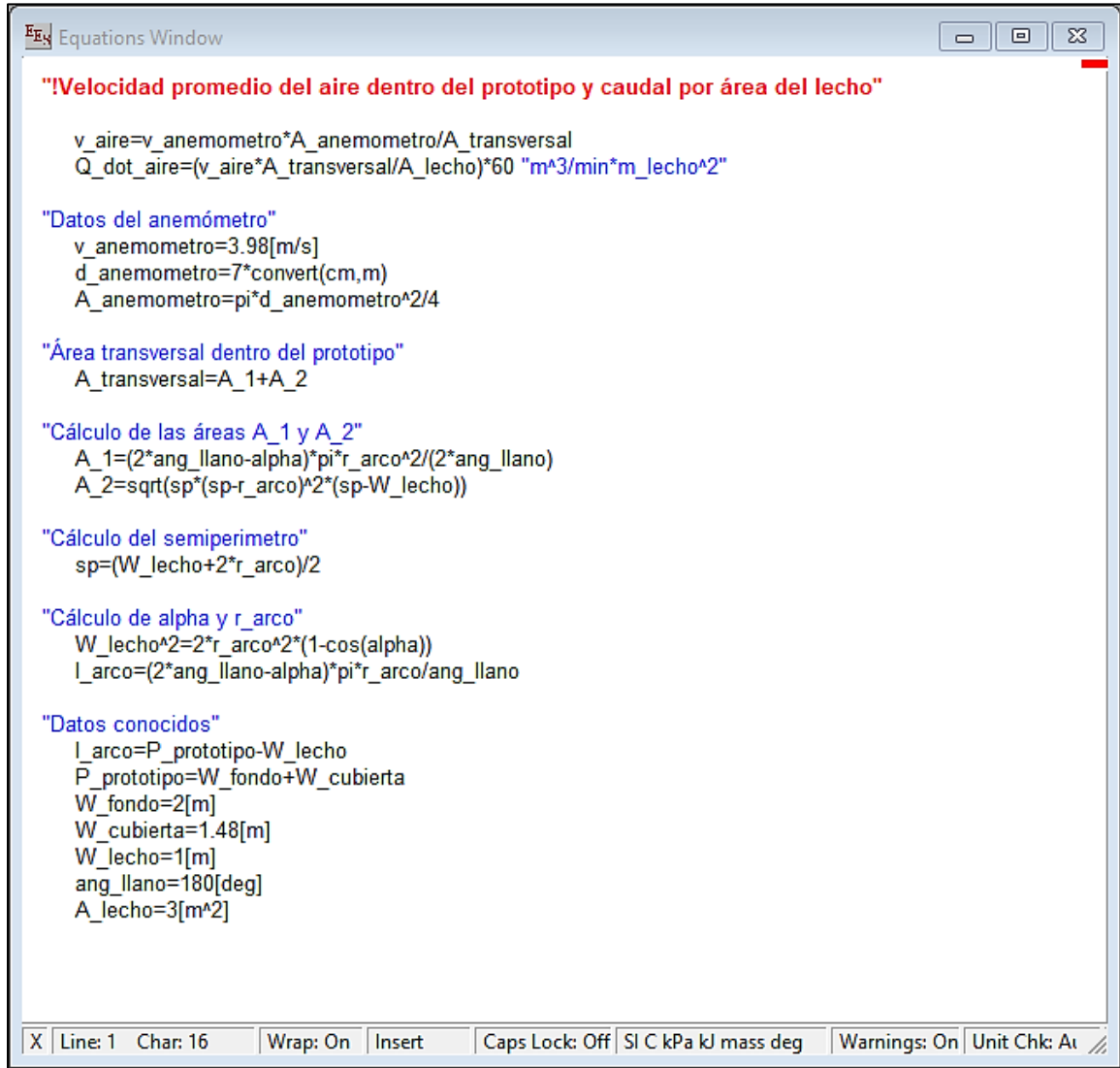


Figura E.1 Vista interna del prototipo de secador cargado con granos de cacao. La superposición en verde corresponde a la aproximación del área transversal al flujo del aire con un sector circular A_1 y un sector triangular A_2 .

El sistema no lineal de estas once ecuaciones fue resuelto empleando el programa EES. Su pseudocódigo y ventana de soluciones se muestran en las Figuras E.2 y E.3.



```

"!Velocidad promedio del aire dentro del prototipo y caudal por área del lecho"

v_aire=v_anemometro*A_anemometro/A_transversal
Q_dot_aire=(v_aire*A_transversal/A_lecho)*60 "m^3/min*m_lecho^2"

"Datos del anemómetro"
v_anemometro=3.98[m/s]
d_anemometro=7*convert(cm,m)
A_anemometro=pi*d_anemometro^2/4

"Área transversal dentro del prototipo"
A_transversal=A_1+A_2

"Cálculo de las áreas A_1 y A_2"
A_1=(2*ang_llano-alpha)*pi*r_arco^2/(2*ang_llano)
A_2=sqrt(sp*(sp-r_arco)^2*(sp-W_lecho))

"Cálculo del semiperímetro"
sp=(W_lecho+2*r_arco)/2

"Cálculo de alpha y r_arco"
W_lecho^2=2*r_arco^2*(1-cos(alpha))
l_arco=(2*ang_llano-alpha)*pi*r_arco/ang_llano

"Datos conocidos"
l_arco=P_prototipo-W_lecho
P_prototipo=W_fondo+W_cubierta
W_fondo=2[m]
W_cubierta=1.48[m]
W_lecho=1[m]
ang_llano=180[deg]
A_lecho=3[m^2]

```

X Line: 1 Char: 16 Wrap: On Insert Caps Lock: Off SI C kPa kJ mass deg Warnings: On Unit Chk: At

Figura E.2 Pseudocódigo del sistema de once ecuaciones resuelto en el programa EES.

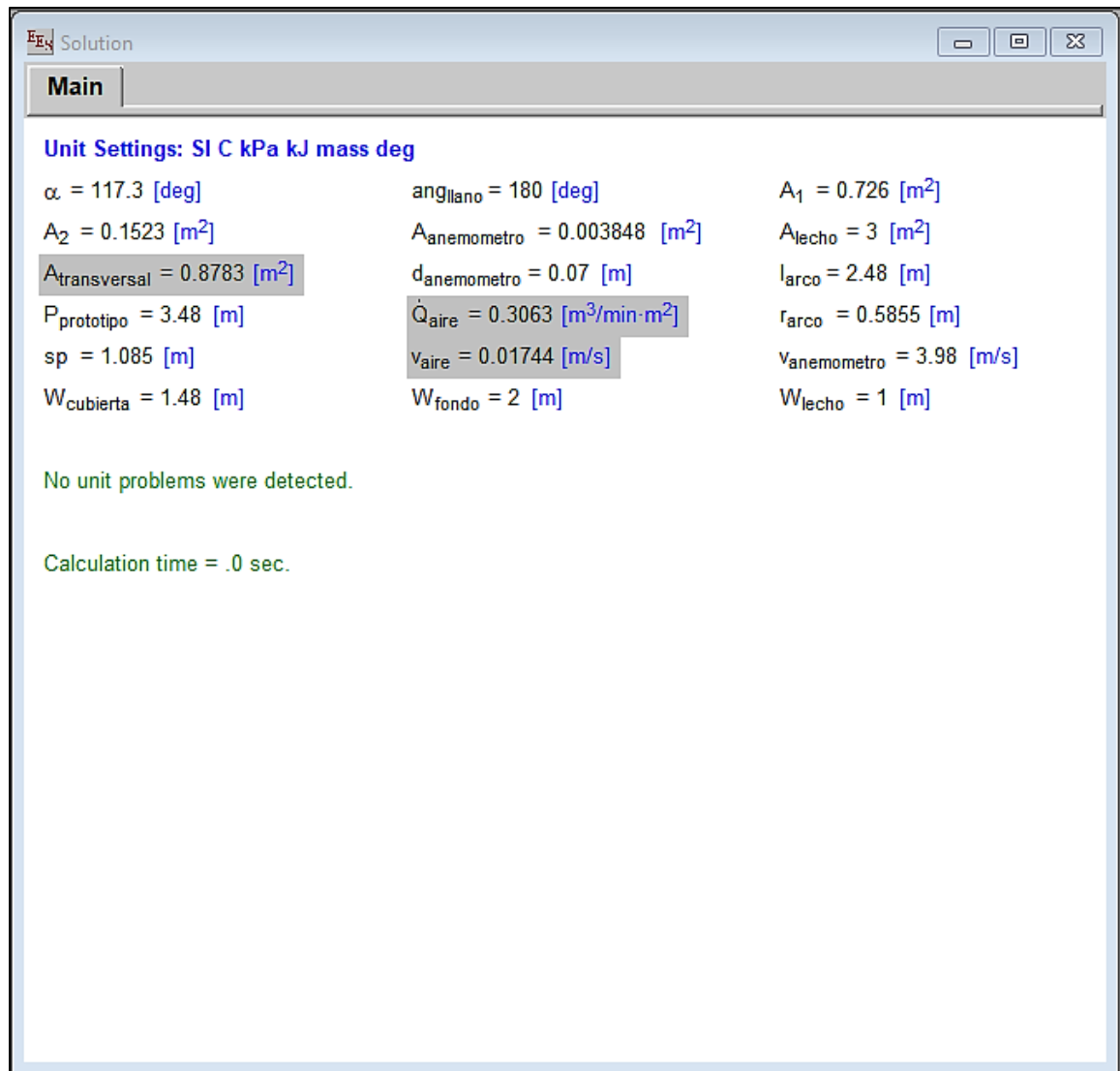


Figura E.3 Ventana de soluciones para el sistema de once ecuaciones resuelto en el programa EES.

10.6 Anexo F

Pseudocódigo para el cálculo de la eficiencia energética promedio.

```
TESIS1.m x +
1 %% Cargar los datos
2 load DATOS.mat;
3
4 % Datos adicionales
5 Alecho=3; % Área del lecho [m^2]
6 Pf=80*0.75; % Potencia nominal del ventilador a su respectiva PWM [W]
7
8 %% Gráficas Irradiancia-Temperatura del Aire-Humedad Relativa del Aire
9 f1=figure("Name", 'IRRADIANCIA, TEMP. Y HR DEL AIRE DÍA', 'NumberTitle', 'off');
10
11 %% Gráficas para el día 1
12
13 % Subplot de Irradiancia (3,5,1)
14 subplot(3,5,1);
15 area(IRRADIANCIA.CodigoT(1:71),IRRADIANCIA.Irradiancia(1:71), 'FaceColor', '#9cd7f0');
16 hold on;
17 plot(IRRADIANCIA.CodigoT(1:71),IRRADIANCIA.Irradiancia(1:71), 's', 'Color', 'b', 'MarkerSize', 5);
18 hold off;
19 % Editar ejes para subplot(3,5,1)
20 ylim([100 1400]);
21 yticklabels(["200", "", "600", "", "1000", "", "1400"]);
22 ylabel("Irradiancia [W/m^2]");
23 xlim([0.375 0.625]);
24 xtl=linspace(0.375,0.625,7);
25 xticks(xtl);
26 xticklabels(["", "", "", "", "", "", ""]);
27
```

Figura F.1 Instrucción al programa MATLAB para leer los datos de irradiancia, propiedades del aire, temperatura del grano, calor latente de vaporización y masa de agua evaporada.

```
TESIS1.m x +
58
59 %% Cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 1
60
61 % Cálculo de la energía empleada para la evaporación "Eev1" [J]
62 TGCLV1 = TGCLV{1:159,7:10};
63 CLV1=mean(TGCLV1,"all")/10^3;
64 Eev1=AEVA.mwdia(1)*CLV1;
65
66 % Cálculo de la energía suministrada por la radiación "ES1" [J]
67 ts1=IRRADIANCIA.Min(1:71)*60; % Tiempo de incidencia solar [s]
68 ES1=trapz(ts1,IRRADIANCIA.Irradiancia(1:71))*Alecho/10^6;
69
70 % Cálculo de la energía consumida por el ventilador "Ef1" [J]
71 tPf1=IRRADIANCIA.Min(71)*60; % Tiempo de operación del ventilador [s]
72 Ef1=Pf*tPf1/10^6;
73
74 % Cálculo de la energía total suministrada "ET1" [J]
75 ET1=ES1+Ef1;
76
77 % Cálculo de la eficiencia energética promedio sin ventilador "nsin1" [%]
78 nsin1=Eev1/ES1*100;
79
80 % Cálculo de la eficiencia energética promedio con ventilador "ncon1" [%]
81 ncon1=Eev1/ET1*100;
82
83
84
```

Figura F.2 Pseudocódigo en MATLAB para el cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 1 de exposición solar.


```
TESIS1.m x +
133
134 %% Cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 2
135
136 % Cálculo de la energía empleada para la evaporación "Eev2" [J]
137 TGCLV2 = TGCLV{160:403,7:10};
138 CLV2=mean(TGCLV2,"all")/10^3;
139 Eev2=AEVA.mwdia(2)*CLV2;
140
141 % Cálculo de la energía suministrada por la radiación "ES2" [J]
142 ts2=IRRADIANCIA.Min(72:172)*60; % Tiempo de incidencia solar [s]
143 ES2=trapz(ts2,IRRADIANCIA.Irradiancia(72:172))*Alecho/10^6;
144
145 % Cálculo de la energía consumida por el ventilador "Ef2" [J]
146 tPf2=IRRADIANCIA.Min(172)*60; % Tiempo de operación del ventilador [s]
147 Ef2=Pf*tPf2/10^6;
148
149 % Cálculo de la energía total suministrada "ET2" [J]
150 ET2=ES2+Ef2;
151
152 % Cálculo de la eficiencia energética promedio sin ventilador "nsin2" [%]
153 nsin2=Eev2/ES2*100;
154
155 % Cálculo de la eficiencia energética promedio con ventilador "ncon2" [%]
156 ncon2=Eev2/ET2*100;
157
158
159
```

Figura F.3 Pseudocódigo en MATLAB para el cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 2 de exposición solar.

```
TESIS1.m x +
208
209 %% Cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 3
210
211 % Cálculo de la energía empleada para la evaporación "Eev3" [J]
212 TGCLV3 = TGCLV{404:645,7:10};
213 CLV3=mean(TGCLV3,"all")/10^3;
214 Eev3=AEVA.mwdia(3)*CLV3;
215
216 % Cálculo de la energía suministrada por la radiación "ES3" [J]
217 ts3=IRRADIANCIA.Min(173:273)*60; % Tiempo de incidencia solar [s]
218 ES3=trapz(ts3,IRRADIANCIA.Irradiancia(173:273))*Alecho/10^6;
219
220 % Cálculo de la energía consumida por el ventilador "Ef3" [J]
221 tPf3=IRRADIANCIA.Min(273)*60; % Tiempo de operación del ventilador [s]
222 Ef3=Pf*tPf3/10^6;
223
224 % Cálculo de la energía total suministrada "ET3" [J]
225 ET3=ES3+Ef3;
226
227 % Cálculo de la eficiencia energética promedio sin ventilador "nsin3" [%]
228 nsin3=Eev3/ES3*100;
229
230 % Cálculo de la eficiencia energética promedio con ventilador "ncon3" [%]
231 ncon3=Eev3/ET3*100;
232
233
234
```

Figura F.4 Pseudocódigo en MATLAB para el cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 3 de exposición solar.

```
TESIS1.m  +
284 %% Cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 4
285
286 % Cálculo de la energía empleada para la evaporación "Eev4" [J]
287 TGCLV4 = TGCLV{646:934,7:10};
288 CLV4=mean(TGCLV4,"all")/10^3;
289 Eev4=AEVA.mwdia(4)*CLV4;
290
291 % Cálculo de la energía suministrada por la radiación "ES4" [J]
292 ts4=IRRADIANCIA.Min(274:394)*60; % Tiempo de incidencia solar [s]
293 ES4=trapz(ts4,IRRADIANCIA.Irradiancia(274:394))*Alecho/10^6;
294
295 % Cálculo de la energía consumida por el ventilador "Ef4" [J]
296 tPf4=IRRADIANCIA.Min(394)*60; % Tiempo de operación del ventilador [s]
297 Ef4=Pf*tPf4/10^6;
298
299 % Cálculo de la energía total suministrada "ET4" [J]
300 ET4=ES4+Ef4;
301
302 % Cálculo de la eficiencia energética promedio sin ventilador "nsin4" [%]
303 nsin4=Eev4/ES4*100;
304
305 % Cálculo de la eficiencia energética promedio con ventilador "ncon4" [%]
306 ncon4=Eev4/ET4*100;
307
308
309
310 %% Cálculo para el día 5
```

Figura F.5 Pseudocódigo en MATLAB para el cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 4 de exposición solar.

```
TESIS1.m  +
358
359 %% Cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 5
360
361 % Cálculo de la energía empleada para la evaporación "Eev5" [J]
362 TGCLV5 = TGCLV{935:end,7:10};
363 CLV5=mean(TGCLV5,"all")/10^3;
364 Eev5=AEVA.mwdia(5)*CLV5;
365
366 % Cálculo de la energía suministrada por la radiación "ES5" [J]
367 ts5=IRRADIANCIA.Min(395:end)*60; % Tiempo de incidencia solar [s]
368 ES5=trapz(ts5,IRRADIANCIA.Irradiancia(395:end))*Alecho/10^6;
369
370 % Cálculo de la energía consumida por el ventilador "Ef5" [J]
371 tPf5=IRRADIANCIA.Min(end)*60; % Tiempo de operación del ventilador [s]
372 Ef5=Pf*tPf5/10^6;
373
374 % Cálculo de la energía total suministrada "ET5" [J]
375 ET5=ES5+Ef5;
376
377 % Cálculo de la eficiencia energética promedio sin ventilador "nsin5" [%]
378 nsin5=Eev5/ES5*100;
379
380 % Cálculo de la eficiencia energética promedio con ventilador "ncon5" [%]
381 ncon5=Eev5/ET5*100;
382
383
384
```

Figura F.6 Pseudocódigo en MATLAB para el cálculo de la eficiencia energética promedio para el día 5 de exposición solar.

10.7 Anexo G

Tabla de masa agua evaporada durante la exposición solar y almacenamiento, masa de muestras y broza. Tabla de energías relacionadas para el cálculo de la eficiencia energética promedio del prototipo de secado.

Evaluación de un prototipo de secador solar inflable de bolsa para el secado de cacao

Tabla G.1 Resumen de masas por día de granos de cacao medidas y calculadas (en *itálicas*).

Día	Horas de exposición solar [h]	$m_{i,dia}$ [kg]	$m_{f,dia}$ [kg]	$m_{muestras,dia}$ [kg]	$m_{broza,dia}$ [kg]	$m_{w,dia}$ [kg]	$m_{w,alm}$ [kg]
1	3.5	84.60	74.10	0.42	0.00	<i>10.08</i>	-
2	5.0	68.30	62.10	0.48	0.10	5.62	<i>5.80</i>
3	5.5	59.10	52.95	0.41	0.13	5.61	<i>3.00</i>
4	6.0	52.30	47.45	0.44	0.10	4.31	<i>0.65</i>
5	6.0	47.30	44.55	0.41	0.07	2.27	<i>0.15</i>

$m_{i,dia}$, masa de cacao introducida al secador.

$m_{f,dia}$, masa de cacao retirada del secador.

$m_{muestras,dia}$, masa de muestras de granos retirados del secador.

$m_{broza,dia}$, masa de broza retirada del lecho.

$m_{w,dia}$, masa de agua evaporada al finalizar el período de exposición solar.

$m_{w,alm}$, agua evaporada durante los períodos de almacenamiento entre el final del período de exposición solar del día “i” hasta el inicio del período de exposición solar del día “i+1”.

Tabla G.2 Resultados para la temperatura promedio del sólido y calor latente de vaporización a dicha temperatura y de energías relacionadas con cálculo de eficiencia energética del secador.

Día	$\bar{T}_{sol,dia}$ [°C]	λ_v [kJ/kg]	$E_{ev,dia}$ [MJ]	$E_{s,dia}$ [MJ]	$E_{f,dia}$ [MJ]	$E_{T,dia}$ [MJ]
1	41.32	2402.64	24.22	33.35	0.76	34.10
2	38.31	2409.89	13.54	50.59	1.08	51.67
3	37.73	2411.24	13.53	55.04	1.08	56.12
4	40.87	2403.75	10.36	56.70	1.30	58.00
5	46.62	2389.89	5.43	63.77	1.30	65.06

$\bar{T}_{sol,dia}$, temperatura promedio del sólido por cada día.

λ_v , calor latente de vaporización.

$E_{ev,dia}$, energía utilizada por día para evaporar la humedad del material.

$E_{s,dia}$, energía solar suministrada por día al secador.

$E_{f,dia}$, energía consumida por el ventilador.

$E_{T,dia}$, energía total suministrada al prototipo.

Anexo H

Reporte del perfil físico-sensorial del cacao secado en el prototipo de secador.

Reporte de Evaluación Físico-Sensorial

1. Información general

Cliente: María Carolina Urbina Cornavaca

Fecha de análisis: 4 de abril de 2022

Muestra: Cacao

Cantidad: 1 kg

2. Resultados:

2.1. Parámetro a medir: Sensorial

Tabla 1 Perfil sensorial de la muestra (1 menos intenso a 5 más intenso)

Perfil Sensorial	Resultado
Chocolate	4
Acidez	3
Astringencia	2
Humo	1
Tierra	1

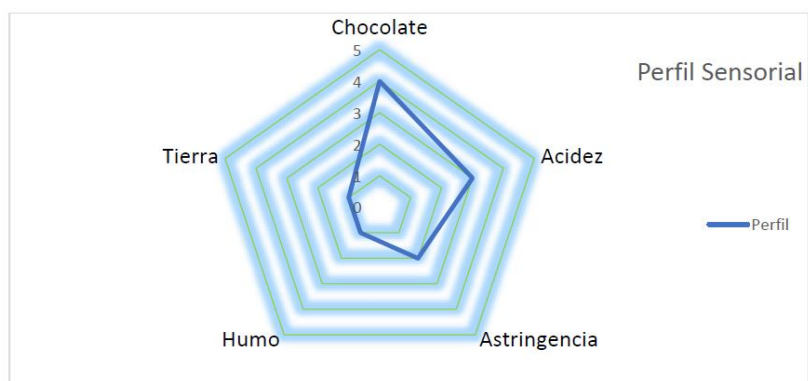


Figura H.1 Resultados del perfil sensorial en valoración de calidad del cacao secado en el prototipo de secador.

Inspección y ensayos de granos

2.2. Parámetro a medir: físico

- En base a *NTC 1252 Cacao en Grano*

Humedad	Metodología
7.8%	Estufa 103 $\pm$ 2 °C, 24 hr

Tabla 2 Análisis de prueba de corte, expresado en % de una muestra de 100 granos (137.34 g)

Calidad	Oferta
Cacao	C-0422-01
Parámetro	Resultado
Mohosos	2%
Germinados	-
Aplanados	2%
Morados	4%
Pizarrosos	2%
% Fermentado	80 %
Cáscara	0%
Grano pequeño	4%
Moho externo	-
Semi fermentado	5%
Granos pelados	-
Granos Quebrados	1%
Materia Extraña	-

Figura H.2 Resultados de la determinación de humedad y del análisis de prueba de corte en valoración de calidad del cacao secado en el prototipo de secador.

Anexo I

Certificados logrados en el tercer certamen “Agroinnovación 2021”

