

Universidad del Papaloapan

Campus Tuxtepec

Ingeniería en Alimentos

T E S I S

Cálculos para el diseño de un secador solar de
semillas de cacao (*Theobroma cacao*) para
productores de la Cuenca del Papaloapan

QUE PRESENTA:

Cesia Berenice Delfín Pérez

PARA OBTENER EL GRADO DE:

Ingeniera en Alimentos

Director:

Dr. Lucio Abel Vázquez León
Investigador CONACYT-UNPA

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, Septiembre de 2023.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN CAMPUS TUXTEPEC

INGENIERÍA EN ALIMENTOS

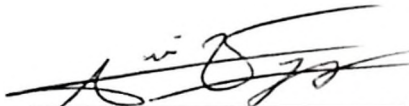
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la ciudad de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, el día 17 de Mayo del 2023 a las 17:00 h, los miembros de la comisión revisora de tesis designada por la jefatura de carrera de Ingeniería en Alimentos, se reunieron con la finalidad de examinar el trabajo de tesis titulado: **“Cálculos para el diseño de un secador solar de semillas de cacao (*Theobroma cacao*) para productores de la Cuenca del Papaloapan”** presentada por la egresada de la carrera: **C. Cesia Berenice Delfín Pérez**, aspirante al título de Licenciatura.


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la comisión manifestaron que la tesis satisface los requisitos señalados por el reglamento vigente, otorgando su aprobación para que la aspirante pueda proceder con el proceso de titulación.

Tuxtepec, Oaxaca. Mayo 30 del 2023.


ATENTAMENTE LA COMISIÓN REVISORA




Dr. Lucio Abel Vázquez León
Universidad del Papaloapan
Director y revisor de tesis



Dra. Delia Esther Páramo Calderón
Universidad del Papaloapan
Revisora de tesis



Dr. Jesús Carrillo Ahumada
Universidad del Papaloapan
Revisor de tesis



M. en C. Fernando Zapot Hazas
Universidad del Papaloapan
Revisor de tesis



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
CAMPUS TUXTEPEC

INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Oficio No.:	JCIA/083/2023
Asunto:	Autorización de impresión de tesis

Tuxtepec, Oax. 16 de Mayo del 2023

ME. Yesenia Barrientos Arenal
Jefa de Servicios Escolares
Universidad del Papaloapan

Con base en el dictamen de la comisión revisora del trabajo de tesis titulado: “Cálculos para el diseño de un secador solar de semillas de cacao (*Theobroma cacao*) para productores de la Cuenca del Papaloapan” de la egresada **C. Cesia Berenice Delfín Pérez**, se autoriza la impresión del trabajo de tesis para obtener el título de Licenciado en **Ingeniería en Alimentos**.

Por lo anterior y de acuerdo al reglamento institucional, se le da trámite legal para que proceda a la impresión del trabajo presentado.

El jurado del examen profesional estará compuesto por los siguientes profesores investigadores:

- Dra. Delia Esther Páramo Calderón** (Presidente, Universidad del Papaloapan)
- Dr. Jesús Carrillo Ahumada** (Secretario, Universidad del Papaloapan)
- Dr. Lucio Abel Vázquez León** (Vocal, Universidad del Papaloapan)
- M. en C. Fernando Zapot-Hazas** (Primer suplente, Universidad del Papaloapan)



Atentamente
Terra uberrima, mensa perta
Bou Lo-tama, chi jí jú

UNPA
INGENIERIA EN ALIMENTOS
CAMPUS TUXTEPEC
Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros
Egresada de Carrera. Ingeniería en Alimentos

UNPA
VICE-RECTORIA ACADEMICA
Vo. Bo. M.C. Héctor López
Vice Rector Académico

- ccp. Egresado, para su conocimiento
- ccp. Dr. Lucio Abel Vázquez León, Director de tesis, para su conocimiento
- ccp. Archivo

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado del trabajo y las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

Dedicatoria

A Dios

Por darme todo lo que tengo, por fortalecerme y ayudarme en los momentos difíciles. Gracias por siempre acompañarme; toda la gloria sea para ti, Jehová.

A mi mamá

Por apoyarme y brindarme esta maravillosa herencia del conocimiento. Gracias mami por esforzarte tanto para darme lo mejor, porque confiaste en mí, me ayudaste en gran manera y me tienes en tus oraciones con tanto amor. Te amo.

A mis hermanos

Yosias y Elia, gracias por estar aquí conmigo, por enseñarme cosas valiosas que me son útiles en todo tiempo. Es un honor ser su hermana, los amo.

Reconocimientos

A la Universidad del Papaloapan, por el trabajo desempeñado para el apoyo a Productores de cacao de la Cuenca del Papaloapan.

Al Dr. Lucio Abel Vázquez León, mi director de tesis, por brindarme la oportunidad de colaborar en este trabajo de investigación, por su valioso conocimiento impartido y su mentoría.

A la Dra. Delia Esther Páramo Calderón, por ser una gran docente, y siendo parte importante del inicio y seguimiento del presente trabajo.

A los miembros del comité de revisión: Dra. Delia Esther Páramo Calderón, Dr. Jesús Carrillo Ahumada y M.C. Fernando Zapot Hazas, por contribuir significativamente en la corrección y mejoramiento del presente trabajo.

A cada uno de los profesores-investigadores de la Universidad del Papaloapan por contribuir en mi formación profesional.

Resumen

Delfín Pérez, Cesia Berenice. Ingeniería en Alimentos. Universidad del Papaloapan, campus Tuxtepec. Septiembre 2023. **Cálculos para el diseño de un secador solar de semillas de cacao (*Theobroma cacao*) para productores de la Cuenca del Papaloapan**. Director de tesis: Dr. Lucio Abel Vázquez León.

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. El calor es necesario para evaporar la humedad, la cual es removida de la superficie del producto por medio de un agente secador externo, generalmente aire; para el secado de semillas de cacao puede realizarse de dos formas, que son, de manera natural (al sol y/o a la sombra) y por convección forzada. El secado natural del cacao consiste en la exposición al sol, y aprovechando el calor de los rayos solares para secar lenta y paulatinamente las semillas de cacao, el tiempo de exposición al sol es de 5 a 7 días según las condiciones climáticas y la cantidad de grano a secar. Durante esta operación unitaria, las semillas de cacao completan satisfactoriamente los cambios bioquímicos internos, logrando buenas características sensoriales. El presente trabajo tuvo como objetivo general proponer los cálculos suficientes para el diseño y construcción de un secador solar para el secado de granos de cacao fermentados, con capacidad mínima de 200 kg de producto de entrada; y que sea amigable con el medio ambiente y rentable, de acuerdo con las demandas y necesidades de productores de cacao de la Cuenca del Papaloapan del programa social “Producir para Conservar Tuxtepec”. Las variables de diseño que se estimaron fueron: energía requerida para calentar el aire de secado, área de captación de radiación solar, velocidad del aire de secado, tasas de secado, tiempo de secado, área de contacto entre el aire de secado y la muestra. La participación de la Universidad del Papaloapan en dicho programa es brindar asesoría sobre la línea de producción del cacao y, específicamente con este proyecto, se ofrecen soluciones al proceso de secado.

Palabras clave: secado solar, cacao, pequeños productores, Cuenca del Papaloapan.

Contenido

Dedicatoria	iv
Reconocimientos	v
Resumen	vi
Contenido	vii
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras	xi
Lista de símbolos	xiii
1 Introducción	1
2 Antecedentes	2
2.1 Generalidades del cacao	2
2.1.1 Cultivo y comercialización de cacao en el marco internacional y nacional	3
2.1.2 Cultivo de cacao en la Cuenca del Papaloapan, México	3
2.1.3 Composición química del cacao	5
2.2 Proceso del beneficio del cacao	6
2.3 Efectos del secado en el beneficiado de cacao	8
2.4 Tipos de secadores utilizados durante el beneficio de cacao	9
2.4.1 Secado al sol y a la sombra	10
2.4.2 Secador de bandeja o armario	12
2.4.3 Secador rotatorio	13
2.4.4 Secador por túnel	13
2.5 Diseños de secadores solares para cacao	14
3 Justificación	19
4 Objetivos	20
4.1 Objetivo general	20

4.2	Objetivos específicos	20
5	Metodología	21
5.1	Identificación de las necesidades del cliente/productor	21
5.2	Consideraciones de diseño del secador solar	22
5.3	Especificaciones preliminares del secador solar	23
5.4	Desarrollo conceptual.....	25
5.4.1	Bases de cálculo y características de secado.....	25
5.4.2	Estimación del flujo de aire de secado	25
5.4.3	Estimación del tiempo de secado a velocidad lineal del aire de secado fijo.....	28
5.4.4	Estimación del área de contacto de secado	29
5.4.5	Estimación de la energía necesaria para calentar el flujo de aire de secado.....	30
5.4.6	Estimación del área de captación de radiación solar.....	31
6	Resultados y discusión.....	32
6.1	Carga de agua a evaporar en función de las humedades iniciales típicas de granos de cacao fermentados	32
6.2	Flujo mínimo del aire de secado para alcanzar la humedad final comercial del grano de cacao en función de las condiciones ambientales.....	33
6.2.1	Impacto de las condiciones ambientales sobre las humedades del aire de secado	34
6.2.2	Impacto de las condiciones ambientales sobre la entalpía de vaporización del agua en la interfase.....	36
6.2.3	Impacto de las condiciones ambientales sobre el tiempo de secado y el flujo del aire de secado, a una humedad inicial fija de la alimentación	38
6.3	Efecto de las condiciones ambientales y la humedad en la alimentación sobre la tasa de evaporación y el tiempo de secado, a una velocidad del aire de secado fija	41
6.4	Estimación del área de contacto entre el gas de secado y el lecho de granos de cacao fermentados.....	44
6.5	Estimación de la cantidad de energía necesaria para calentar el aire de secado	47
6.6	Recomendaciones de construcción del secador solar tipo habitación	50
6.6.1	Mesas de secado	50
6.6.2	Dimensiones, características particulares y distribución del secador solar tipo habitación	51

7	Conclusiones	56
8	Referencias	57
	Anexo A.....	61
	Anexo B	66

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Composición química de la pulpa y la semilla de cacao.	5
Tabla 5.1 Necesidades del cliente/productor y su importancia en el diseño del secador solar.	21
Tabla 5.2 Variables que debieron definirse para concretar el diseño del secador solar para granos de cacao fermentados.	24
Tabla 6.1 Humedad del aire seco a la entrada del secador a 60 °C (y_1) considerando diferentes condiciones ambientales iniciales, y humedad del aire al finalizar el proceso de secado de granos de cacao fermentados (y_2) considerando saturación del aire.	35
Tabla 6.2 Entalpías de vaporización del agua (λ_w) a diferentes temperaturas de saturación del gas de secado (T_w) utilizado durante el procesamiento de granos de cacao fermentados, considerando diferentes condiciones ambientales iniciales.	37
Tabla 6.3 Tiempo de secado y flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (G'') requeridos para alcanzar la humedad final comercial (7.5 kg agua/100 kg producto), considerando diferentes condiciones ambientales iniciales y una humedad inicial del cacao fermentado de 0.5 kg agua/kg alimentación.	39
Tabla 6.4 Área de contacto entre el gas de secado y el lecho fijo de granos de cacao fermentados estimada a partir de los datos obtenidos ($n = 60$) mediante la Ec. (10).	46

Lista de Figuras

Figura 2.1 Fruto de cacao (<i>Theobroma cacao</i>).....	2
Figura 2.2 Principales estados productores de cacao en México durante 2011-2021	4
Figura 2.3 Diagrama del proceso de beneficiado del cacao.	6
Figura 2.4 Secado al sol de cacao en tendales	11
Figura 2.5 Secado a la sombra de cacao tipo invernadero	12
Figura 2.6 Secador de bandeja para secado de cacao.....	12
Figura 2.7 Secador rotatorio para cacao	13
Figura 2.8 Secador para cacao tipo túnel	14
Figura 2.9 Plano del secador solar rotativo	15
Figura 2.10 Secador solar con precalentamiento del aire	16
Figura 2.11 Secador solar tipo invernadero.	17
Figura 6.1 Cantidad de agua por evaporar en los granos de cacao fermentados para alcanzar una humedad final comercial de 7.5 kg agua/100 kg producto, en función de su humedad inicial (kg agua/100 kg alimentación).....	33
Figura 6.2 Velocidad del aire de secado para alcanzar una humedad final comercial de 7.5 kg agua/100 kg producto, en función de las condiciones ambientales iniciales.....	40
Figura 6.3 Tasas de secado (m) en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H ₂ O/kg alimentación)	42
Figura 6.4 Tiempos de secado en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H ₂ O/kg alimentación)	43
Figura 6.5 Áreas de secado en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H ₂ O/kg alimentación)	46

Figura 6.6 Energía requerida para calentar el aire de secado desde temperatura ambiente (25-55 °C) hasta la temperatura de operación (60 °C), en función de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H ₂ O/kg alimentación).....	47
Figura 6.7 Errores relativos promedios de las energías requeridas para calentar el aire de secado desde temperatura ambiente (25-55 °C) hasta la temperatura de operación (60 °C) estimadas mediante la Ec. (11) <i>versus</i> las energías estimadas a partir de la Ec. (12), considerando distintas áreas de secado.....	49
Figura 6.8 Dimensiones de las mesas de secado (a) para granos de cacao fermentados y acercamiento de la malla de acero inoxidable (b) recomendada como plancha de la mesa.	50
Figura 6.9 Vista lateral derecha y frontal del secador solar tipo habitación.....	52
Figura 6.10 Vista lateral izquierda y trasera del secador solar tipo habitación.....	52
Figura 6.11 Alerón tipo persiana ajustable de acero inoxidable para instalación agrícola (a) y ventilador para instalación agrícola (b).....	53
Figura 6.12 Área de captación de radiación solar en función de la energía requerida para calentar el aire de secado.....	54
Figura 6.13 Distribución del interior del secador solar tipo habitación.	55

Lista de símbolos

G'	Aire húmedo a la entrada del secador	$kg \text{ aire}$
F	Alimentación	kg
A	Área de contacto de secado entre la superficie del lecho de granos de cacao fermentados y el flujo de aire de secado	m^2
A_c	Área efectiva de captación de la radiación solar	m^2
C_p	Calor específico del aire	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
\dot{Q}	Cantidad de energía necesaria para calentar el aire	W
G/t	Caudal másico de aire seco a la entrada del secador	$kg \text{ aire seco} \cdot s^{-1}$
h	Coefficiente de transferencia de calor	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
Erp	Error relativo	
L	Espesor medio del lecho de secado limitado por el grosor medio del grano de cacao	m
G''	Flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador	$kg \text{ aire} \cdot s^{-1}$
x_i	Fracción másica de agua de la alimentación en la entrada del secador	
x_o	Fracción másica de agua de la alimentación en la salida del secador	
x_1	Humedad en base seca de los granos de cacao a la entrada del secador $x_i \cdot (1 - x_i)^{-1}$	$kg H_2O \cdot kg \text{ sólidos secos}^{-1}$
x_2	Humedad en base seca de los granos de cacao a la salida del secador $x_o \cdot (1 - x_o)^{-1}$	$kg H_2O \cdot kg \text{ sólidos secos}^{-1}$
y_1	Humedad en base seca del aire a la entrada del secador	$kg H_2O \cdot kg \text{ aire seco}^{-1}$
y_2	Humedad en base seca del aire a la salida del secador	$kg H_2O \cdot kg \text{ aire}^{-1}$
I	Índice de radiación solar que para la Cuenca del Papaloapan	$W \cdot m^{-2}$
M	Masa total de agua por evaporar	kg

G	Masa total de aire seco utilizado en el proceso de secado	kg
N	Número de datos experimentales	
p	Presión	atm
r	Radio del ventilador o ducto	m
m	Tasa de secado o de evaporación	$kg\ agua \cdot s^{-1}$
T	Temperatura de bulbo seco del aire de secado	$^{\circ}C$
T_w	Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado	$^{\circ}C$
T_i	Temperatura media del aire en el ambiente que rodea al secador solar	$^{\circ}C$
t	Tiempo de secado	s
V	Velocidad lineal del aire de secado	$m \cdot s^{-1}$
Me_i	Valores de energía	
Mp_i		

Símbolos Griegos

$\rho_{d\beta}$	Densidad de los granos secos de cacao	$kg \cdot m^{-3}$
η	Eficiencia de una máquina térmica	
λ_w	Entalpía de vaporización a temperatura de bulbo húmedo	$J \cdot kg^{-1}$

1 Introducción

El cacao es uno de los frutos más importantes de México desde la época prehispánica. En la actualidad es significativa la economía que ofrece, siendo México uno de los principales exportadores de cacao para Estados Unidos y países de la Unión Europea; los estados productores de cacao de la República Mexicana son Tabasco, Chiapas, Guerrero, Yucatán y Oaxaca. Teniendo tan sólo en el estado de Oaxaca 600 productores aproximadamente, algunos localizados en la Cuenca del Papaloapan, en donde su cultivo es reciente y se tiene la necesidad inmediata de impulsar su crecimiento y sostenibilidad. El proceso de beneficiado es un requisito indispensable para la comercialización competente de las semillas de cacao, con la finalidad de proporcionar ciertas características bioquímicas y sensoriales al producto y para mejorar su vida de anaquel y condiciones de almacenamiento; una de las etapas críticas del beneficiado es el secado, y en las semillas de cacao se puede realizar de dos formas, secado natural (al sol y/o a la sombra) o secado por convección forzada (secado rotatorio, por túnel, tambor o bandejas). Para delimitar las condiciones de secado que permitan obtener eficientemente productos con características específicas, es necesario seleccionar y/o diseñar correctamente los equipos secadores y controlar sus variables, como la temperatura de secado, la humedad relativa del aire, el flujo de aire; y definir las características del producto a secar, como el área de contacto entre el aire de secado y el producto, la masa de agua por remover, su estructura física.

Conociendo las necesidades de los recientes productores de cacao de la región de la Cuenca del Papaloapan, y a través de una revisión bibliográfica sobre los métodos y diseños de secado, en el presente trabajo de investigación se plantea como objetivo principal el diseño de un secador solar para el secado de granos de cacao fermentados; y está constituido de las siguientes secciones, generalidades del cacao, el proceso del beneficio del cacao, las características de secadores utilizados durante el beneficio de cacao, así como los objetivos del proyecto, la metodología propuesta, los resultados y discusión, y la conclusión del proyecto.

2 Antecedentes

2.1 Generalidades del cacao

El fruto de cacao (*Theobroma cacao*) tiene forma de baya, de 30 cm de largo y 10 cm de diámetro, son de sabor amargo, y color característico, ver Figura 2.1 (Ogata, 2007).



Figura 2.1 Fruto de cacao (*Theobroma cacao*). Fuente: Ogata (2007)

Los suelos más apropiados para el árbol de cacao son los francos, franco-arenoso y franco-arcillosos, con pH de 6-7. Para que el cacao en México tenga un crecimiento apropiado, floración y fructificaciones abundantes, la temperatura media anual óptima debe estar entre los 23 y 28 °C. La cantidad de lluvia que requiere el cultivo de cacao oscila entre 1500 y 2500 mm en las zonas del trópico húmedo y de 1000 a 1500 mm en las zonas más templadas o en los valles más altos, la precipitación adecuada es la que oscila entre los 1200 mm y 2500 mm bien distribuida durante todo el año. Para una producción óptima de cacao, la humedad debe ser tal que se mantenga entre los niveles de 50 a 70 %. El cacao en México tolera suelos con una profundidad de 0.60 m, pero lo mejor es seleccionar suelos con profundidad de entre 0.8 y 1.5 m, de textura media (francos, franco-arcillosos, franco-arenosos) con buena retención de humedad y buen drenaje. Los principales estados productores de cacao en México son Chiapas, Tabasco y Oaxaca (Arvelo-Sánchez *et al.*, 2017; SAGARPA, 2017).

2.1.1 Cultivo y comercialización de cacao en el marco internacional y nacional

En 2019, cacao en grano, entero o partido, crudo o tostado fue el producto número 321 más comercializado en el mundo, por un total de \$9,56 MM. Entre 2018 y 2019 las exportaciones aumentaron en un 3.32 %, desde \$9,25 MM a \$9,56 MM. El comercio de cacao en grano, entero o partido, crudo o tostado representa 0.053 % del total del comercio mundial; los principales exportadores durante 2019 fueron Costa de Marfil (\$3,84 MM), Ghana (\$1,61 MM), Nigeria (\$715 M), Ecuador (\$668 M), y Camerún (\$647 M); y los principales países importadores fueron Países Bajos (\$2,2 MM), Alemania (\$991 M), Malasia (\$895 M), Estados Unidos (\$869 M), y Bélgica (\$729 M) (OEC, 2023).

En México, actualmente la producción de cacao a nivel nacional asciende a más de 28 mil toneladas; es cultivado por cerca de 37 mil productores de pequeña escala ubicados en los estados de Tabasco, Chiapas y Guerrero, que en suma siembran 59 mil hectáreas que generan más de 56 millones de dólares; en promedio cada productor tiene 1.6 hectáreas. Aunque también hay producción a menor escala en Oaxaca, Veracruz y Yucatán. El 1 % del total de la producción nacional se exporta a Estados Unidos y países de la unión Europa (SAGARPA, 2017; SADER, 2020).

2.1.2 Cultivo de cacao en la Cuenca del Papaloapan, México

De acuerdo con el Anuario Estadístico de la Producción Agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), los principales y únicos Estados productores de cacao en México son Tabasco, Chiapas y Guerrero (Figura 2.2). En la última década Oaxaca aparece en la lista sólo en 2011, con una superficie sembrada de 22 ha, pero sin registro de producción; esto a pesar de que se consumieron aproximadamente 2 mil toneladas de chocolate en ese año. Cabe señalar que el cacao consumido en Oaxaca fue traído de Tabasco y Chiapas (Ocampo-Brondo *et al.*, 2012; SIAP, 2023).

La Universidad del Papaloapan ha apoyado a productores de cacao de la Cuenca del Papaloapan a través de capacitación y apoyo para la siembra, manejo, cosecha y producción de chocolate y otros derivados del cacao. Los productores mencionados forman parte del proyecto “Producir para Conservar Tuxtepec”, el cual les ha gestionado la entrega de plantas de caco a diferentes comunidades interesadas en fomentar la producción de cacao en el municipio de Tuxtepec y la región.

La Cuenca del Papaloapan ubicada en el norte del estado de Oaxaca abarca los distritos de Tuxtepec y Choapan, es una de las regiones más favorables para impulsar la producción del cacao, por cumplir con las características del clima y el suelo para su cultivo (Vásquez, 2016), sin embargo, a la fecha de presentación del presente documento, aún no se cuenta con una producción o cosecha bien registrada o establecida en la zona; de ahí la importancia de impulsar proyectos como el que se reporta en este manuscrito.

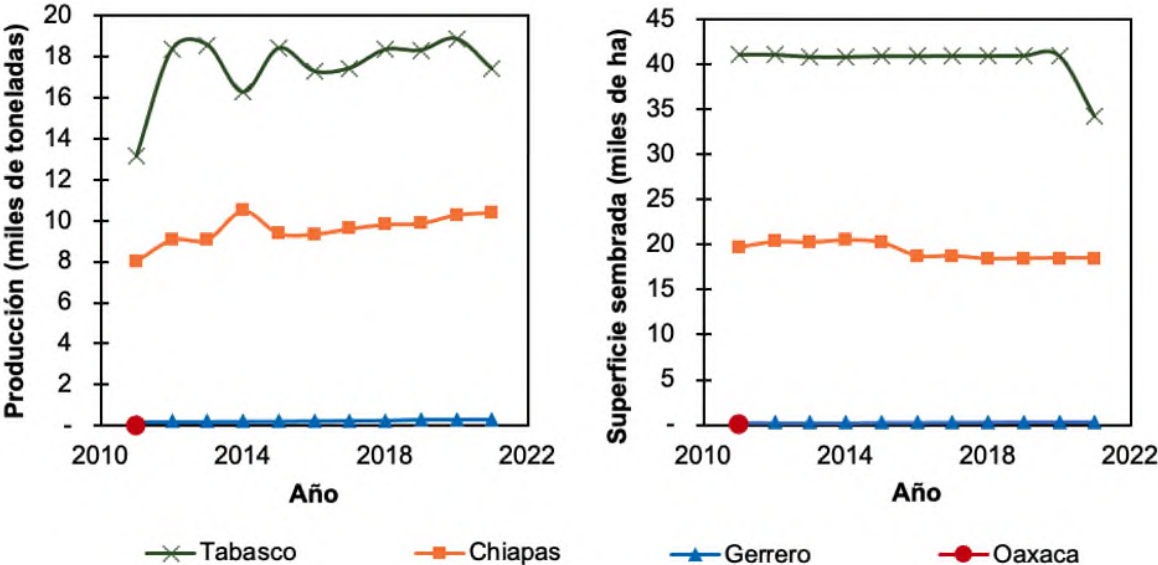


Figura 2.2 Principales estados productores de cacao en México durante 2011-2021. Fuente: SIAP (2023).

2.1.3 Composición química del cacao

En la Tabla 2.1 se muestra la composición química de la semilla y mucílago del cacao, como podemos observar el componente mayoritario de la semilla, después del agua, está representado por los carbohidratos.

Cabe señalar que la teobromina presente en los frutos maduros de cacao, en los cotiledones secos, la cascarilla seca, el germen y en todos productos y subproductos derivados del cacao, es una sustancia alcaloide al que se le atribuye el sabor amargo en las semillas del cacao, y éstas la contienen entre el 1% y el 4%, mientras que en el cacao en polvo está presente entre el 2% y el 10%, esta concentración se alcanza debido a la remoción de humedad que se realiza durante el beneficiado de cacao. Esta sustancia es el equivalente químico de la cafeína del café. Su nombre se deriva del nombre científico de la planta del cacao, *Teobroma cacao* (BIOPAT, 2015).

Tabla 2.1 Composición química del mucílago y la semilla de cacao.

Componente	Contenido en 100 g de mucílago	Contenido en 100 g de semilla
Agua	79.2 g	8.7 g
Proteína	2.8 g	19.0 g
Lípidos	0.3 g	17.1 g
Carbohidratos	16.5 g	47.8 g
Fibra	1.1 g	6.9 g
Ceniza	1.2 g	7.4 g
Calcio	6.0 mg	200.0 mg
Fósforo	41.0 mg	801.0 mg
Hierro	0.7 mg	10.5 mg
Tiamina	1.8 mg	0.02 mg
Riboflavina	0.15 mg	0.20 mg
Niacina	3.20 mg	2.50 mg
Vitamina C	21.00 mg	18.90 mg

Fuente: BIOPAT (2015)

2.2 Proceso del beneficio del cacao

El beneficio o curado es el proceso que se realiza al grano de cacao desde el momento de ser recolectado en el campo hasta convertirlo en un producto de comercialización, durante este proceso reúne las condiciones físicas, químicas y sensoriales que exige la industria y el consumidor final (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019). Dicho proceso involucra los pasos representados en la Figura 2.3, y se resumen a continuación.

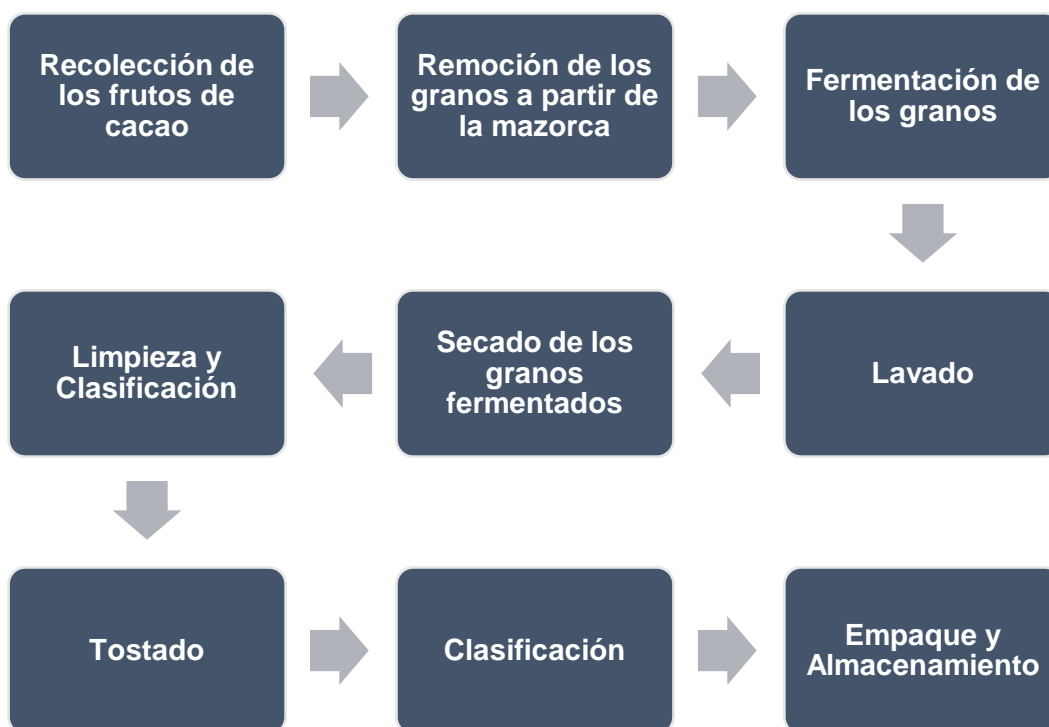


Figura 2.3 Diagrama del proceso de beneficiado del cacao.

La fermentación la realiza una sucesión de microorganismos (levaduras, bacterias ácido lácticas y bacterias ácido acéticas), que comienza en condiciones anaeróbicas (sin presencia de oxígeno) y termina en condiciones aeróbicas (en presencia de oxígeno). Cuando el mucílago se descompone, hay liberación de calor y la temperatura de la masa puede llegar a los 45-50 °C. En esta etapa se forma alcohol, ácido láctico y ácido acético que permeabilizan la testa o membrana que

cubre los granos. Estos compuestos y la temperatura participan en la muerte del embrión, propiciando la disolución y difusión de los pigmentos (antocianinas) y alcaloides (teobromina y cafeína), que producen el sabor amargo del producto terminado. La muerte del embrión es indispensable para que se desencadenen los procesos bioquímicos que tienen lugar dentro del grano (Cubillos *et al.*, 2008; Solórzano *et al.*, 2021). Finalizando el proceso de fermentación las semillas de cacao tienen una humedad en un intervalo de 60 a 70%.

Después de la fermentación el cacao se debe secar inmediatamente, no solo para sacar la humedad del grano que debe quedar al 7%, sino también, para que continúen algunas reacciones bioquímicas que finalmente desencadenen los precursores del sabor. Por lo tanto, es tan importante el secado como una buena fermentación (Cubillos *et al.*, 2008; Solórzano *et al.*, 2021). Los métodos de secado pueden ser naturales o por convección forzada; dependiendo del método que se utilice la rapidez de secado puede ser de mayor o menor tiempo (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019; Solórzano *et al.*, 2021). Finalizado el proceso de secado, continúa un proceso de selección del grano seco para su almacenamiento, distribución y comercialización.

La última etapa del procesamiento primario de los granos de cacao es el tostado, que cumple varias funciones fisicoquímicas y sensoriales. Esta etapa ayuda a reblandecer y retirar la testa de las almendras, las vuelve más frágiles, como preparación a la molienda o prensado, pero sobre todo, desarrolla a partir de los precursores generados en la fermentación y el secado, aún más el sabor del cacao o el característico a chocolate. Este proceso continúa promoviendo la disminución de la acidez, al reducir las concentraciones de ácidos volátiles como el ácido acético, aunque no la de otros ácidos no volátiles como el oxálico, cítrico, tartárico, succínico y láctico (Vázquez-Ovando *et al.*, 2016).

Como el objeto del presente estudio involucró la etapa de secado, en la siguiente sección se describe específicamente dicha operación.

2.3 Efectos del secado en el beneficiado de cacao

El secado es una operación del beneficiado del cacao, que junto con la fermentación le aportan calidad comercial al producto. Su importancia radica principalmente en la disminución del contenido de agua, desde 50-70% a 6-8% de humedad, esto no sólo mejora el manejo, transporte y almacenamiento del producto, sino que también prolonga su vida útil evitando el crecimiento de microorganismos y disminuyendo cambios en el perfil sensorial (aroma y sabor deseables) en los granos de cacao. El contenido de humedad de los granos secos no debe ser mayor al 8% por la propensión de los granos a enmohecerse, tampoco debe estar por debajo del 6%, porque los granos se vuelven frágiles y quebradizos (Cubillos *et al.*, 2008). No debe reducirse más la humedad porque cuando baja del 6 % las almendras se vuelven quebradizas y sufren durante el transporte, pero si no se secan adecuadamente (> 7 %) son muy propensas a contaminarse de mohos (hongos) lo cual constituye uno de los peores defectos de la calidad (Dubón, 2016), esto porque al ser un producto agrícola altamente higroscópico, a humedades alrededor del 8 % existe riesgo de rehumidificación y por consiguiente, desarrollo de hongos (Páramo-Calderón *et al.*, 2010; (Delgado Ospina, Molina Hernández, Chavez López, Romanazzi, & Paparella, 2021)).

Durante el secado se da la fase oxidativa de la fermentación, por lo que juega un papel importante en la disminución de la astringencia, amargor y acidez del grano, así también se desarrolla el color marrón en los granos a partir de los compuestos fenólicos, azúcares reductores y proteínas, cabe señalar que esto ocurre solamente en esta etapa. En resumen, durante el secado se presentan algunos cambios fundamentales para alcanzar características y propiedades comerciales: inactivación de enzimas; el color de los cotiledones cambia de color a café; se inicia la percepción al aroma de chocolate; se volatiliza el ácido acético y láctico y disminuye el amargo del cacao (Valdivia, 2015).

2.4 Tipos de secadores utilizados durante el beneficio de cacao

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. El calor es necesario para evaporar la humedad, la cual es removida de la superficie del producto por medio de un agente secador externo, generalmente aire. Durante el secado de granos de cacao fermentado, la temperatura debe subir lentamente y no exceder los 60 °C. Para la deshidratación de las semillas de cacao sólo puede hacerse de dos formas que son de manera natural (al sol y/o a la sombra) y por convección forzada. Los secadores por convección forzada que se utilizan generalmente son los secadores de bandeja o armario, secador rotatorio y el secador por túnel (Cros y Jeanjean, 1995; Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019; Bardales *et al.*, 2021).

El secado debe hacerse de forma lenta y gradual, el proceso de secado violento no permite lograr un secado homogéneo e interrumpe la hidrólisis enzimática, generando almendras de color púrpura con sabor astringente. El secado violento además produce un endurecimiento rápido de la testa o cascarilla, lo cual impide la salida o difusión de los ácidos volátiles generando almendras con sabor ácido (Ramos, 2004; Solórzano *et al.*, 2021).

Otro problema que a menudo se observa es que el mucilago que rodea a la cáscara se adhiere a los granos, obstruye los poros y contribuye a la retención del agua, debido a que la cáscara se seca rápidamente si se aplican temperaturas altas y la velocidad de secado disminuye considerablemente después de pocos minutos. Es preferible un secado rápido empleando una velocidad de aire elevada, y con la temperatura moderada (65 °C) en la fase inicial del proceso; esto permite que la humedad de la superficie se evapore sin causar encogimiento del cotiledón, resultando en una testa permeable al oxígeno. Mientras que, en la etapa final de secado se recomienda llevarla a cabo a temperaturas mayores (80 °C) empleando bajas velocidades de aire. Con esto, se promueve el oscurecimiento de los granos y se producen menos granos con la testa fuertemente adherida (Hashim *et al.*, 1999; Páramo-Calderón *et al.*, 2010).

2.4.1 Secado al sol y a la sombra

Se considera como un secado natural del cacao aquel que consiste en la exposición directa o indirecta al sol, lo cual tiene como fin aprovechar el calor de los rayos solares para secar lenta y paulatinamente las semillas de cacao. El tiempo de exposición al sol es de 5 a 7 días según las condiciones climáticas y la cantidad de grano a secar. Durante esta operación unitaria, las semillas de cacao completan satisfactoriamente los cambios bioquímicos internos, logrando buenas características sensoriales. Este tipo de secado se puede realizar utilizando tendales (Figura 2.4), los mismos que pueden ser contruidos de varias formas, usando madera, bambú, cemento u otros materiales refractarios. Este tipo de secado es un proceso practicado por la mayoría de los pequeños productores que consiste en poner a secar el grano de cacao, pero no ofrece ninguna protección en el momento de un cambio climático como es la lluvia, además el secado no es uniforme, lo cual provoca defectos en el grano. Para lograr una buena aireación y uniformidad en este tipo de secado es necesario mantener en movimiento los granos, al menos cada media hora. También se utiliza el secado dentro de invernaderos o a la sombra (Figura 2.5), esto es en especial para algunas variedades de cacao que no pueden recibir directamente los rayos ultravioletas y para proteger a las semillas de factores perjudiciales del medio externo (Cros y Jeanjean, 1995; Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).

Durante el secado al sol del cacao, la velocidad promedio del descenso de la humedad en el grano es función del número de días de secado y varía considerablemente según las condiciones climáticas imperantes al exponer los granos al sol, dependiendo de la temperatura ambiente y velocidad del viento (Ghosh y Cunha, 1975), puesto que el calor y el movimiento del aire contribuyen a la remoción de la humedad. En este proceso, la pérdida de agua es gradual y continua (Ghosh y Cunha, 1975; Dias y Ávila, 1993; Selamat y Mordingah Harun, 1994; Efraim *et al.*, 2010). Durante este proceso continúan los cambios químicos y bioquímicos que se inician en la fermentación de los granos y el contenido de los azúcares reductores (AR) es, en parte, reducido por su participación en las reacciones de oscurecimiento no enzimático, esto es en las reacciones de Maillard,

para formar fracciones volátiles de pirazinas (Hashim *et al.*, 1999). Esta reacción, que es favorecida por las altas temperaturas, también ocurre cuando éstas son bajas (30-50 °C), ya que cuando el secado procede lentamente, el período de actividad de agua (aw) durante el cual las condiciones para la reacción de Maillard son óptimas es más largo (Cros y Jeanjean, 1995). Por otra parte, la concentración de sacarosa es disminuida por hidrólisis enzimática, reacción que continúa hasta que la enzima invertasa es inactivada por el incremento de la temperatura y la pérdida de humedad (Cros y Jeanjean, 1995; Hashim *et al.*, 1999).

Se reporta la disminución de la acidez total de los granos en el primer día de exposición al sol del cacao, con una reducción del 56,14%, permaneciendo constante en los días restantes del secado. La reducción de la acidez de los granos coincide con el mayor descenso de la humedad (Nogales *et al.*, 2006). Al respecto, varios investigadores observaron que juntamente con la pérdida de agua que se produce durante el secado, ocurre una merma de la acidez, específicamente de los ácidos volátiles y libres. Esta disminución de la acidez es favorecida cuando el secado procede lentamente y se establece un balance entre las velocidades de evaporación del líquido en la testa y de la difusión de los líquidos del cotiledón (Dias y Ávila, 1993; Selamat y Mordingah Harun, 1994).



Figura 2.4 Secado al sol de cacao en tendales. Fuente: Nogales (2022).



Figura 2.5 Secado a la sombra de cacao tipo invernadero. Fuente: Aguilar (2020).

2.4.2 Secador de bandeja o armario

Normalmente formado por una cámara metálica rectangular que contiene unos soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores, cada uno con un número de bandejas poco profunda, donde se cargará el material a secar (Figura 2.6). El aire caliente circula por medio de intercambio de calor, normalmente con tuberías por las que pasa vapor de agua. Cuando las características de diseño lo permiten, las bandejas pueden ser perforadas para aumentar el área de contacto entre el sólido y el aire, disminuyendo así la duración del secado (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).



Figura 2.6 Secador de bandeja para secado de cacao. Fuente: Shanghai Tianhe Pharmaceutical Machinery Co. (2023).

2.4.3 Secador rotatorio

Secador de flujo continuo (Figura 2.7), posee una carcasa cilíndrica que gira sobre sus soportes y trabaja con una ligera inclinación respecto a la horizontal. Su longitud está en relación con el diámetro variando entre 4 y 10 veces más esta dimensión. El material que interesa avanza por gravedad en virtud de la rotación e inclinación, saliendo secos por el extremo opuesto. Cuando los gases avanzan en el sentido de la descarga, éstos ayudan al material a avanzar; pero también pueden ir en sentido contrario (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).



Figura 2.7 Secador rotatorio para cacao. Fuente: Palini y Alves (2023).

2.4.4 Secador por túnel

Se asemejan a los secadores de bandeja, pero tienen un funcionamiento semicontinuo. Aquí las bandejas se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado, con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja con un flujo que puede ser a contracorriente, en paralelo o una combinación de ambos (Figura 2.8). Al introducir una nueva carretilla, la primera está siendo evacuada con el producto seco mientras las restantes se adelantan una posición en su recorrido. Así, éstos conservan la flexibilidad de los de bandeja en cuanto a gama de productos que permite deshidratar aumentando la capacidad de producción con un funcionamiento prácticamente continuo (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).



Figura 2.8 Secador para cacao tipo túnel. Fuente: [directindustry.com](https://www.directindustry.com) (2023).

2.5 Diseños de secadores solares para cacao

El uso de uno u otro equipo de secado que se ha reportado puede ejercer efecto sobre las características sensoriales del producto final, en este sentido se ha reportado que los contenidos de alcoholes, ésteres y pirazinas se ven aumentados durante el proceso de secado al sol mientras que los de ácidos, aldehídos y cetonas disminuidos (Selamat y Mordingah Harun, 1994; Rodriguez-Campos *et al.*, 2011), lo cual coloca el secado al sol como el mejor método para obtener el máximo sabor y las mejores características comerciales durante el beneficiado de cacao.

Las diferencias en las características del producto final asociadas a los diferentes métodos de secado se deben principalmente a las características físicas del grano, temperaturas, velocidades del flujo de aire y tiempos de secado; en consecuencia, los mecanismos de transferencia de masa y energía impactan en el proceso y a su vez en las características finales del cacao. Por ejemplo, existe evidencia experimental que ha demostrado que durante el secado artificial los ácidos grasos volátiles del cacao no se reducen al mismo nivel que durante el secado al sol y, por lo tanto, los granos de cacao secados artificialmente contienen una mayor acidez que impacto negativamente en su aceptación sensorial. Dado que esta mayor acidez se encontró en el secado por convección, que ocurre a mayor velocidad que el secado al sol, es probable que sea el resultado de una transferencia más lenta de los ácidos grasos volátiles con respecto al agua, o podría atribuirse al incremento

en la resistencia a la transferencia de masa de la cáscara de los granos de cacao durante el secado (Páramo-Calderón *et al.*, 2010).

Si bien durante el secado natural la evaporación de la humedad se limita por el movimiento del aire, el potencial de secado de ese mismo aire y por la influencia directa de la energía solar (Dalpasquale *et al.*, 1991), existen diferentes diseños que se han desarrollado para aprovechar al máximo estos recursos de la naturaleza y que a continuación se discuten.

El **secador solar rotativo** consta de una caja cuyos costados son de madera, con frente y fondo de malla de alambre (Figura 2.9). El secador tiene una inclinación variable, pues su eje de rotación está alineado en dirección norte-sur. La inclinación debe acompañar el movimiento en dirección sur, en vista de la colocación del secador en diversas posiciones durante el día, para aprovechar mejor la energía solar. Además de esto, también se aprovecha mejor la acción del viento, dado que, dependiendo de la dirección de éste el aire pasa a través de la capa de producto y facilita el secado de toda la masa. La acción de revolver el producto, mediante la rotación, es importante para que la humedad final sea uniforme en toda la masa. La principal limitante de estos diseños es la capacidad de carga (Dalpasquale *et al.*, 1991).

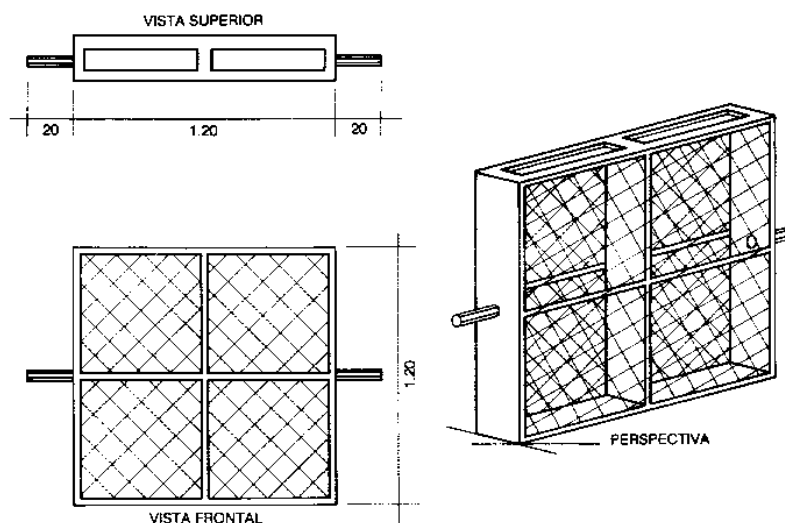


Figura 2.9 Plano del secador solar rotativo. Fuente: Dalpasquale *et al.* (1991).

En el **secador solar con precalentamiento del aire** (Figura 2.10) el aire se calienta en el colector solar antes de pasar a la cámara de secado. El producto se coloca sobre una malla de 1.5 mm. Este secador almacena la energía solar debido a un lecho que se debe pintar de color negro opaco, algunos lechos son de piedra y en los últimos años se han utilizado paneles de acero. El aire entra por la abertura inferior del secador, se calienta con la energía almacenada en el lecho, el cual está cubierto con un panel transparente, sube por convección natural y pasa por la cámara de secado retirando la humedad del producto (Dalpasquale *et al.*, 1991).

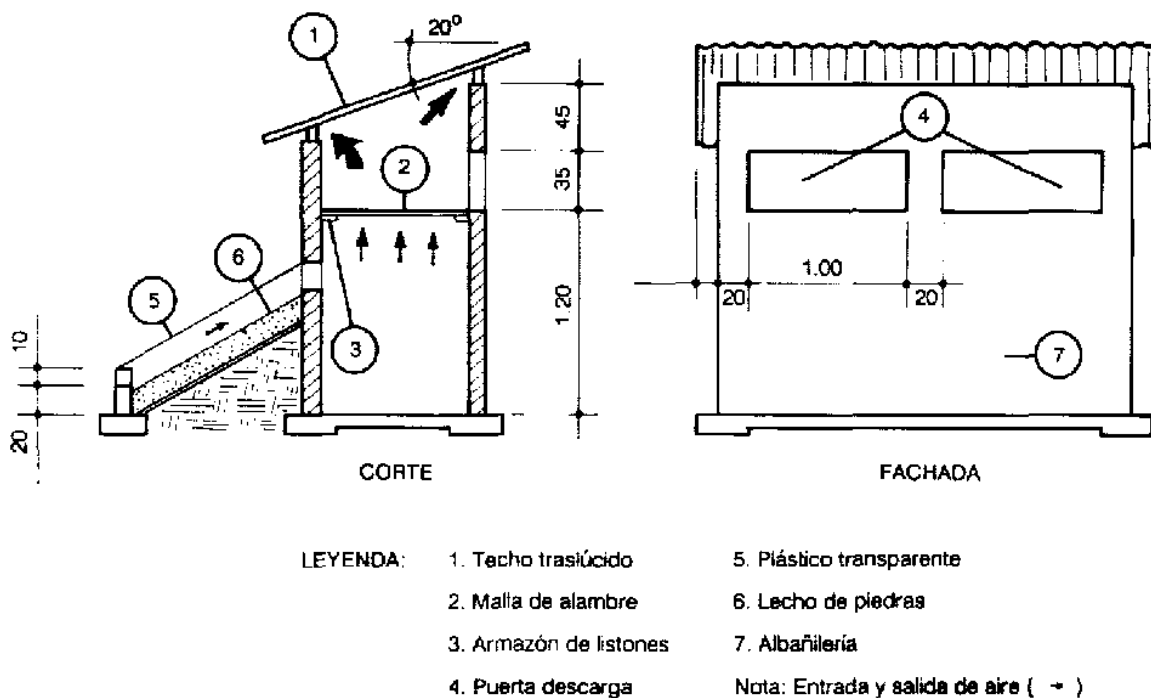


Figura 2.10 Secador solar con precalentamiento del aire. Fuente: Dalpasquale *et al.* (1991).

El **secador solar tipo invernadero** (Figura 2.11) en su presentación básica se puede construir con una armazón de madera y plástico. La cara inclinada del secador se cubre con plástico transparente y se vuelve hacia el sol; las caras laterales se pueden cubrir con plástico de calidad inferior, el piso se cubre con plástico, sin orificios, sobre el cual se coloca una capa de 0.10 a 0.15 m de grano para secar; los bordes del piso pueden ser de madera y deben estar protegidos con

plástico hasta una altura de 0.2 m. para evitar la entrada de agua de lluvia. En la parte inferior del lado inclinado y de las paredes laterales se debe dejar una abertura de 0.2 a 0.3 m de altura para facilitar la entrada del aire. Se debe dejar la misma abertura en la parte superior del lado opuesto al lado inclinado, para facilitar la salida del aire. El aire que entra por la base del secador se calienta ahí mismo, lo que aumenta su potencial de secado y provoca su salida por convección natural, en la parte superior (Dalpasquale *et al.*, 1991).

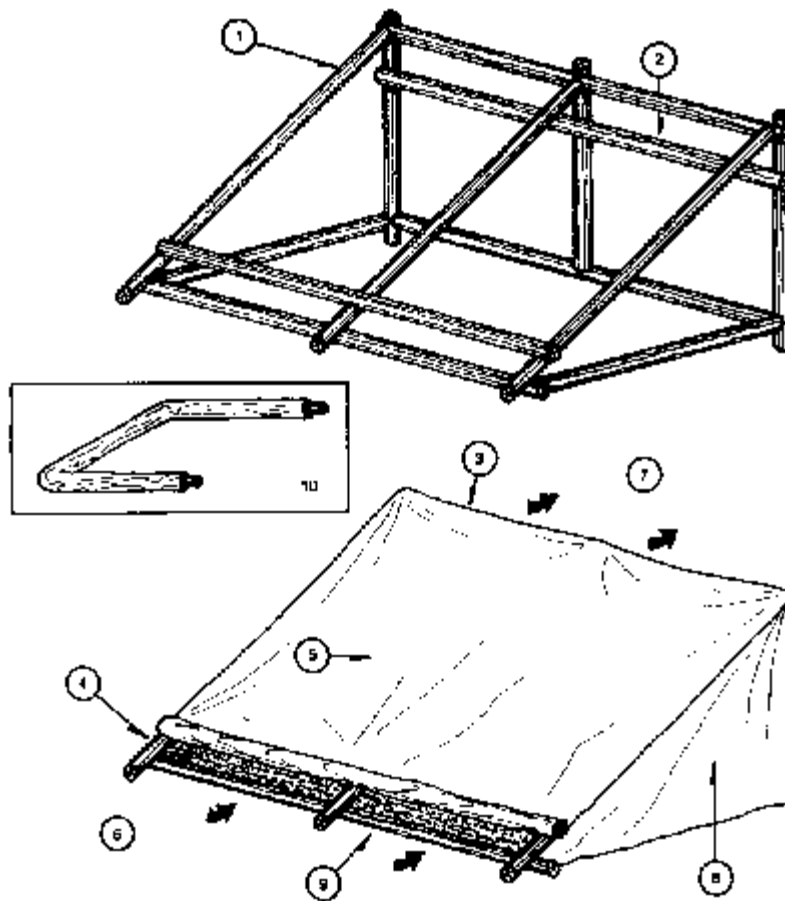


Figura 2.11 Secador solar tipo invernadero. Fuente: Dalpasquale *et al.* (1991).

El **secador solar tipo túnel de policarbonato** (Figura 2.12) desarrollado por Janjai (2012) para el uso de secado de alimentos por industrias a pequeña escala consiste en un techo parabólico cubierto con hojas de policarbonato, estructura de acero galvanizado y piso de concreto. Las dimensiones de dicho secador son 8 m de

ancho, 20 m de largo y 3.5 m de alto, con una capacidad de carga de 1000 kg de frutas o vegetales. Las principales modificaciones realizadas al diseño original fueron la integración de ventiladores en el techo para homogeneizar la temperatura interna y acelerar el proceso de secado, activados mediante una celda solar, y el uso de aluminio en su estructura para hacerlo más ligero, durable y portable. La cubierta de policarbonato unicelular marca Makrolon Bayer utilizada en este diseño tiene un grosor de 6 mm, cuenta con protección UV y está montada sobre una estructura de aluminio y base de acero galvanizado. Al interior de dicha cubierta, instalados en el techo, se encuentran cuatro ventiladores de 4 pulgadas de 12 V para homogeneizar el calor interno y en la parte posterior se encuentran tres ventiladores de 4 pulgadas de 12 V para la extracción del aire (Janjai, 2012).



Figura 2.12 Secador solar tipo invernadero diseñado por Janjai (2012).

3 Justificación

El cacao es un cultivo originario de México con alta importancia cultural y económica, principalmente para la producción de chocolate. Este producto tiene un consumo per cápita anual de 0.5 kg, el cual representa 0.6% del gasto total realizado en alimentos, bebidas y tabaco por las familias mexicanas. Actualmente se satisface sólo el 41.22% de los requerimientos nacionales con la producción interna, lo que establece una dependencia de importaciones provenientes de Ecuador, Costa de Marfil, República Dominicana, Colombia y Ghana, principalmente. En la Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, en el marco de la producción de cacao mexicano, se reconoce a Chiapas, Oaxaca, Tabasco, Puebla y Veracruz, como las regiones potenciales y estratégicas para el cultivo de cacao que permitirán incrementar la producción de este valioso recurso (SAGARPA, 2017).

En la región de la Cuenca del Papaloapan, del estado de Oaxaca, existen aproximadamente 600 productores interesados en montar una línea de aprovechamiento integral de cacao. Una de las etapas del beneficiado del cacao es el secado, y es una de las fases donde se deben de controlar más variables, y el uso de conocimientos ingenieriles es crítico para obtener un buen producto. El secado por convección forzada es un proceso que requiere alto consumo de energía, además los costos de diseño y/o de equipo suelen ser elevados para una inversión inicial. Por esta razón, en el presente proyecto se pretende ofrecer a los productores de cacao los cálculos necesarios para diseñar y construir un secador solar, y así aprovechar las altas temperaturas de Tuxtepec, Oaxaca, con un promedio de 13 h de sol por día en los meses de mayor cosecha de cacao (marzo-agosto) (Arvelo-Sánchez *et al.*, 2017); con esta tecnología se ofrecería la oportunidad de arrancar operaciones a los recién productores de cacao de la Cuenca del Papaloapan. Se optó por establecer los requerimientos mínimos para la construcción de un secador solar que combine las características del tipo invernadero con precalentamiento del aire, tales como calor captado, capacidad de remoción de humedad y capacidad máxima de alimentación.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Establecer los cálculos necesarios para diseñar y construir un secador solar tipo invernadero con precalentamiento de aire para el secado de granos de cacao fermentados, con capacidad mínima de 200 kg de producto de entrada.

4.2 Objetivos específicos

- Estimar los requerimientos de calor y caudal de aire de secado para una habitación destinada al secado de 200 kg de granos de cacao fermentados.
- Estimar el área necesaria para realizar la deshidratación de 200 kg de granos de cacao fermentados.
- Establecer los requerimientos mínimos para el diseño y construcción del habitáculo destinado a la operación de secado de granos de cacao fermentados, en función de las variables estimadas de entrada y de salida del proceso.

5 Metodología

El diseño teórico del secador solar se realizó sobre un enfoque de investigación cuantitativo, esto es, se determinaron las tasas de calor y de aire de secado suficientes para la operación sobre una base de cálculo y posteriormente se diseñó el habitáculo de secado. La metodología que se llevó a cabo en el presente trabajo englobó la recopilación de información y especificaciones del cliente, su traducción al lenguaje de ingeniería, cálculos de diseño, y finalmente la generación gráfica del prototipo con la definición de parámetros de diseño. A continuación, se describen las estrategias seguidas.

5.1 Identificación de las necesidades del cliente/productor

Conociendo la situación actual de la producción y comercialización del cacao en la Cuenca del Papaloapan, así también como los objetivos del presente trabajo, se procedió a la identificación de las necesidades de los productores de cacao con respecto al diseño del equipo a través de un contacto directo con ellos. Dichas necesidades y su importancia se presentan en lenguaje técnico en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Necesidades del cliente/productor y su importancia en el diseño del secador solar.

No.	Necesidades	Importancia
Básicas		
1	Apagado de emergencia	
2	Respaldo técnico del diseñador/fabricante	
3	Fácil mantenimiento y reparación	✓
4	Uso de tecnologías sencillas	✓
5	Disipación de calor	✓
6	Baja contaminación	✓

Tabla 5.1 Continuación.

No.	Necesidades	Importancia
Impacto del secador sobre el producto		
7	Reducción de contaminación del producto	✓
8	Conservación de la calidad del producto	✓
9	Disminución de daños en productos termolábiles	✓
10	Alta velocidad de producción	
Usuario		
11	Fácil operación	✓
12	Fácil instalación y conexión	
De diseño		
13	Bajo monto de inversión	✓
14	Bajo consumo de energía	✓
15	Accesorios y repuestos de fácil adquisición nacional	✓
16	Documentación y manuales de usuario	
17	Ajuste variable de parámetros del sistema	
18	Aumento de la capacidad de captación de energía solar	✓

5.2 Consideraciones de diseño del secador solar

Para encausar el presente proyecto, también se decidió establecer la descripción del equipo a diseñar (producto) con base en los objetivos planteados por el grupo social de incidencia (productores locales de cacao de la Cuenca del Papaloapan), el mercado que hará uso del producto seco (productores locales de subproductos de cacao) así como premisas y restricciones técnicas sobre su uso:

1. La cantidad de humedad que debe eliminarse de los granos fermentados de cacao.
2. Meses de recolección durante los cuales es necesario secar en mayor cantidad.
3. Las horas de sol diarias para la estimación del tiempo total de secado.

4. La cantidad de aire y de calor necesarias para secar.
5. Radiación solar diaria para determinar la energía que recibe el secador por día.
6. Velocidad del gas de secado para el cálculo de las dimensiones de las salidas de aire.

El secador solar entonces se definió como una habitación tipo invernadero con precalentamiento de aire diseñada para garantizar el procesamiento de un grupo campesino capaz de producir 200 kg de granos fermentados de cacao de manera regular, pero con perspectiva de crecimiento anual por la evolución que muestra el mercado. Además, debe captar la radiación solar suficiente para alcanzar la temperatura de operación, la cual se deberá mantener lo suficientemente constante y uniforme, por ello se definieron estrategias para disipar el exceso de calor a través de flujo de aire, que cumpla además la función de remover el vapor de agua de la habitación, así como también suministrar calor en días nublados, o cuando se requiera.

5.3 Especificaciones preliminares del secador solar

Bajo los criterios señalados en las secciones 5.1 y 5.2, se procedió a identificar las variables que debieron definirse en el presente proyecto, y que se presentan en la Tabla 5.2. Para fines de cálculos se considerará la operación del proceso a 1 atm.

Tabla 5.2 Variables que debieron definirse para concretar el diseño del secador solar para granos de cacao fermentados.

No.	Métrica	Unidad
1.	Masa total del producto de entrada	kg
2.	Humedad en el producto de entrada	$\text{kg } H_2O \cdot \text{kg sólidos secos}^{-1}$
3.	Densidad característica del grano de cacao	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
4.	Calor requerido para la remoción de humedad	W
5.	Temperatura de operación	°C
6.	Flujo másico del aire de secado	$\text{kg aire seco} \cdot \text{s}^{-1}$
7.	Humedad del aire de secado	$\text{kg } H_2O \cdot \text{kg aire seco}^{-1}$
8.	Velocidad lineal del aire de secado	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
9.	Mecanismo alterno de producción de calor	---
10.	Producción de producto seco	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
11.	Capacidad máxima de carga	kg
12.	Materiales de las mesas	---
13.	Tamaño de las mesas de secado (L*A)	m
14.	Número de mesas de secado	---
15.	Espacio entre mesas	m
16.	Iluminación	---
17.	Material de las paredes	---
18.	Material del techo	---
19.	Distribución gráfica del habitáculo	---

5.4 Desarrollo conceptual

Con el apoyo de libros de ingeniería en alimentos y de trabajos de investigación previos, se aplicaron ecuaciones de transferencia de masa y calor para la estimación de algunos de los valores objetivos señalados en la Tabla 5.2, y se desarrolló el diseño del secador solar tipo invernadero con precalentamiento de aire. En las siguientes subsecciones se describen algunos de los conceptos y cálculos de ingeniería que debieron aplicarse.

5.4.1 Bases de cálculo y características de secado

Como base para calcular las dimensiones del prototipo de secador solar, se consideraron como características de secado importantes lo siguiente:

- tamaño de lote a procesar de 200 kg (como base de cálculo, a partir de una estimación de producción semanal de un grupo de agricultores de la Cuenca del Papaloapan quienes recién inician la explotación de cacao),
- humedad inicial del producto desde 50 hasta 70 % base húmeda (b.h.), intervalo en el que se reportan las humedades medias para granos de cacao fermentados (Páramo-Calderón *et al.*, 2010; Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).
- humedad final promedio del producto de 7.5 % b.h., estipulada por la NOM-186-SSA1/SCFI-2013 para garantizar un producto físicamente estable y microbiológicamente seguro,
- temperatura crítica del aire de secado de 60 °C, pues es reportado que a temperaturas superiores podrían generarse cambios en los granos de cacao que perjudican su aceptación sensorial (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019).

5.4.2 Estimación del flujo de aire de secado

Para estimar y conseguir la cantidad de aire de secado y en consecuencia su respectivo flujo (en m/s), se consideraron dos aspectos:

- carga de agua a evaporar
- tiempo de secado

Se estimó la cantidad de agua a evaporar con la Ec. (1) (Geankoplis, 2006), considerando la masa del lote a procesar (200 kg), la humedad inicial promedio de los granos de cacao fermentado (50-70 % b.h.) y la humedad final esperada en el producto deshidratado (7.5 % b.h.).

$$M = Fx_i - F(1 - x_i) \frac{x_o}{1-x_o} \quad (1)$$

Donde M es la masa total de agua por evaporar (kg), F es la masa de la alimentación (granos fermentados de cacao por procesar: 200 kg), x_i es la fracción másica de agua de la alimentación en la entrada del secador (0.500-0.700) y x_o es la fracción másica de agua de la alimentación en la salida del secador (0.075).

Para estimar la masa total de aire de secado (kg), se realizó un balance de materia (Ec. 2) para un flujo de aire (gas de secado) en contacto con un sólido húmedo (grano de cacao) (Geankoplis, 2006).

$$G(y_2 - y_1) = F(1 - x_i)(x_1 - x_2) \quad (2)$$

Donde G es la masa total de aire seco utilizado en el proceso de secado (kg), y_1 es la humedad en base seca del aire a la entrada del secador (kg H₂O/kg aire seco), y_2 es la humedad en base seca del aire a la salida del secador (kg H₂O/kg aire seco), $F(1 - x_i)$ es la masa de sólidos secos en la alimentación (kg sólidos secos), x_1 es la humedad en base seca de los granos de cacao a la entrada del secador ($x_i/(1 - x_i)$, en kg H₂O/kg sólidos secos) y x_2 es la humedad en base seca de los granos de cacao a la salida del secador ($x_o/(1 - x_o)$, en kg H₂O/kg sólidos secos). Tanto y_1 como y_2 se estimaron por psicrometría considerando diferentes condiciones ambientales iniciales de acuerdo con las condiciones medias de la región de la Cuenca del Papaloapan: temperatura ambiental en bulbo seco, 25-55 °C; humedad relativa ambiental, 70-90 %. Para y_1 se consideró una temperatura de bulbo seco de 60 °C a la entrada del secador (Barbecho-Guailas y Loja-Juca, 2019). Para y_2 se consideró que el gas de secado alcanzó la saturación.

Nótese que las Ec. (1) y (2) son equivalentes, puesto que por definición la Ec. (1)

representa la masa de agua evaporada del producto y la Ec. (2) representa la masa de agua ganada por el aire seco. Por lo tanto, G representa la cantidad mínima necesaria de aire seco para garantizar que el producto alcance la humedad final deseada. Además, de la Ec. (2) se deduce que la cantidad de aire húmedo a la entrada del secador (G' en kg aire) puede estimarse por la relación:

$$G' = G + Gy_1 \quad (3)$$

Para calcular el flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (G'' en kg aire/s) se decidió estimar el tiempo de secado (t , en s) en el periodo de velocidad constante para productos distribuidos en monocapa o lecho fijo, mediante la siguiente ecuación (Fellows, 2018):

$$t = \frac{\rho_{d\beta} \lambda_w L (x_1 - x_2)}{h(T - T_w)} \quad (4)$$

Donde $\rho_{d\beta}$ es la densidad de los granos secos de cacao (700 kg/m^3), λ_w es la entalpía de vaporización a temperatura de bulbo húmedo (J/kg), L es el espesor medio del lecho de secado limitado por el grosor medio del grano de cacao (0.017 m), x_1 es la humedad en base seca de los granos de cacao a la entrada del secador ($1.000 \text{ kg H}_2\text{O/kg sólidos secos}$, equivalentes a $50 \% \text{ H b.h.}$), x_2 es la humedad en base seca de los granos de cacao que se desea a la salida del secador ($0.081 \text{ kg H}_2\text{O/kg sólidos secos}$), h es el coeficiente de transferencia de calor en la interfase ($30 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), T es la temperatura de bulbo seco del aire de secado ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) y T_w es la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado, la cual se asume también es la temperatura en la superficie del grano de cacao. Las T_w bajo diferentes condiciones ambientales iniciales se estimaron por psicrometría considerando que el gas de secado alcanza la saturación, y entonces se buscó en tablas termodinámicas del agua a 1 atm (Çengel y Ghajar, 2011) las diferentes λ_w correspondientes. Tanto $\rho_{d\beta}$, L y h fueron tomados de lo reportado por Páramo-Calderón *et al.* (2010). Entonces G'' se estimó mediante la siguiente relación:

$$G'' = G' / t \quad (5)$$

Una vez estimado G'' , se definió la velocidad lineal del aire de secado (V en m/s) según la siguiente expresión:

$$V = \frac{G''}{\rho_{\gamma} \pi r^2} \quad (6)$$

Donde V es la velocidad del aire húmedo en m/s a la entrada del secador solar, G'' es el caudal másico de aire de secado en kg/s, ρ_{γ} es la densidad del aire de secado a 60 °C y 1 atm (1.059 kg/m³) y r es el radio del ventilador o ducto por donde ingresa el aire de secado al habitáculo. Para fines de cálculo se fija el valor de $r = 0.25$ m. Se considera que el área transversal de este ducto permanece constante durante todo su trayecto. V puede medirse fácilmente con un anemómetro, y será una variable que el operador deberá mantener constante durante el secado.

5.4.3 Estimación del tiempo de secado a velocidad lineal del aire de secado fijo

Una vez definida la V a partir de la Ec. (6) y con las consideraciones de la sección 5.4.2, se fijó una V operativa (m/s) independiente de las condiciones ambientales iniciales a partir de una regresión lineal. De tal manera que se debió entonces estimar el tiempo de secado bajo tal condición. Para ello, primero se estimó G'' a partir de la Ec. (6) y entonces el flujo másico del aire seco a la entrada del secador (G/t , en kg aire seco/s) se calculó a partir de la siguiente relación:

$$G/t = (G/G')(G'') \quad (7)$$

Donde G/G' representa la fracción de aire seco en el aire del entorno (kg aire seco/kg aire) y G'' el flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (kg aire/s).

Entonces la tasa de secado o de evaporación (m , en kg agua/s) puede estimarse a partir de la relación mostrada en la siguiente ecuación:

$$m = (M/G)(G/t) \quad (8)$$

Finalmente, el tiempo de secado (t) se estimó en función de la tasa de secado (m) y la masa total de agua por evaporar (M) para alcanzar la humedad final comercial:

$$t = M/m \quad (9)$$

Es importante señalar que si bien las Ecs. (4) y (9) son equivalentes para una humedad inicial específica de los granos de cacao fermentados, la Ec. (9) representa una mayor dependencia a la carga de humedad inicial en los granos de cacao al estimarse a partir de la M , lo cual permite estimar el tiempo de secado en función de las diferentes humedades que puede poseer el grano de cacao (0.500-0.700 como fracción másica), mientras que la Ec. (4) depende fuertemente de las condiciones de saturación del aire utilizado para el secado y que en consecuencia llevaría a tener una V variable y dependiente de las condiciones ambientales iniciales, lo cual técnicamente resultaría impráctico para el productor, al tener que estimar la V día a día.

5.4.4 Estimación del área de contacto de secado

Para estimar el área de contacto de secado entre la superficie del lecho de granos de cacao fermentados y el flujo de aire de secado (A , en m^2), se consideró que durante el período de velocidad constante de secado existe un equilibrio entre la tasa de transferencia de calor hacia el producto alimenticio y la tasa de pérdida de masa desde el producto alimenticio, conceptualizado a través de la siguiente ecuación (Fellows, 2018):

$$m = \frac{hA(T-T_w)}{\lambda_w} \quad (10)$$

Donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor en la interfase o superficie ($30 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), T es la temperatura de bulbo seco del aire de secado ($60 \text{ }^\circ\text{C}$), T_w es la temperatura de saturación del aire de secado estimada por psicrometría (Anexo B) y que se asume es igual a la temperatura de la superficie de los granos de cacao, λ_w es la entalpía de vaporización a la T_w correspondiente (J/kg), y m es la tasa de secado (kg agua/s) a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de los granos de cacao fermentados estimada a partir de la Ec. (8). El valor del h fue tomado de lo reportado por Páramo-Calderón *et al.* (2010), mientras que los valores de las λ_w se buscaron en tablas termodinámicas del agua a 1 atm (Çengel y Ghajar, 2011).

5.4.5 Estimación de la energía necesaria para calentar el flujo de aire de secado

La cantidad de energía necesaria para calentar el aire (\dot{Q} en W) se estimó por balance de energía de acuerdo con la siguiente ecuación (Çengel y Ghajar, 2011):

$$\dot{Q} = (G/t)c_p(T - T_i) \quad (11)$$

Donde G/t representa el caudal másico de aire seco a la entrada del secador (kg aire seco/s), c_p es el calor específico del aire (1007 J/kg °C), T es la temperatura de secado (60 °C), T_i es la temperatura media del aire en el ambiente que rodea al secador solar. Ambas temperaturas en bulbo seco.

Se resalta que \dot{Q} es la tasa de calor requerida para calentar el aire desde temperatura ambiente hasta temperatura de operación. De ser necesario, podrían activarse resistencias eléctricas, u otro medio de calentamiento, para garantizar el suministro constante de \dot{Q} , esto en días nublados, por ejemplo.

Se compararon los resultados calculados con la Ec. (11) contra la estimación de la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua de los granos de cacao manteniendo constante el área de contacto entre el gas de secado y los granos de cacao (A , en m²), a través de un balance de energía especificado en la siguiente ecuación (Çengel y Ghajar, 2011):

$$\dot{Q} = hA(T - T_i) \quad (12)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfaz del grano de cacao (30 W/m²K, (Páramo-Calderón *et al.*, 2010)). Se calculó el error estándar relativo entre los resultados obtenidos por la Ec. (11) y la Ec. (12) para validar los resultados, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Errp (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Me_i - Mp_i|}{Me_i} \quad (13)$$

donde Me_i y Mp_i son los valores de energía estimados a partir de las Ecs. (11) y (12), respectivamente, y N es el número de datos experimentales. $Errp$ por debajo del 10% se consideran viables (Vázquez-León *et al.*, 2019).

5.4.6 Estimación del área de captación de radiación solar

La eficiencia de una máquina térmica (η) es estimada a partir de la relación entre la energía utilizada y la energía invertida, de tal manera que para un secador solar la expresión quedaría representada por la siguiente ecuación (Pardhi y Bhagoria, 2013):

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{IA_c} \quad (14)$$

donde η es de 0.4 como máximo para máquinas térmicas reales, \dot{Q} es la energía necesaria para calentar el aire de secado, A_c es el área efectiva de captación de la radiación solar, y finalmente I es el índice de radiación solar que para la Cuenca del Papaloapan es en promedio de 430.4 W/m^2 , según datos del Servicio Meteorológico Nacional recolectados entre mayo y agosto de 2021 a través de la estación CDALEMAN.

Una vez estimada la \dot{Q} se procedió a calcular el A_c para el diseño propuesto en el presente trabajo a partir de la Ec. (14).

6 Resultados y discusión

Al inicio del proceso de secado, los granos de cacao fermentados pueden contener una humedad de 50 hasta 70% b.h. de acuerdo con las características particulares de la fermentación realizada; pero indistintamente de la carga de humedad inicial, por normatividad se desea obtener una humedad final de 7.5% b.h. A partir de esto se realizó una serie de cálculos ingenieriles para estimar la cantidad de aire de secado, dentro de esto: se estimó la carga de agua a evaporar, la masa total de aire de secado (kg) y el flujo másico y lineal del aire de secado a través de la estimación; así también se estableció la energía necesaria para calentar el flujo de aire de secado hasta 60 °C y finalmente, se estimó el área de contacto de secado (con respecto a la superficie del lecho fijo de granos de cacao). A partir de los resultados de estos cálculos se propuso un diseño del secador solar.

6.1 Carga de agua a evaporar en función de las humedades iniciales típicas de granos de cacao fermentados

Por normatividad, se especifica que los granos secos de cacao deben poseer una humedad final comercial de 7.5 kg agua/100 kg producto. Sin embargo, los granos de cacao fermentados poseen una humedad que va desde 50 kg agua/100 kg alimentación hasta 70 kg agua/100 kg alimentación. En consecuencia, existen diferentes cantidades de agua que se deben evaporar para alcanzar la humedad comercial. En la Figura 6.1 se muestran las diferentes cargas de agua por evaporar para diferentes humedades iniciales en la alimentación en un proceso de secado de granos de cacao fermentados. Como era de esperarse, a mayor humedad en la alimentación se deberá evaporar una mayor cantidad de agua desde los granos de cacao fermentados. En consecuencia, para un secador que opere bajo combustión de gas L.P. o energía eléctrica como fuente primaria de calor, el secar productos con un contenido mayor de agua representaría un consumo en exceso de energía para garantizar la humedad comercial. La ventaja de proponer un secador solar radica en que no representaría un mayor gasto económico el trabajar con productos

con una variación tan amplia en la humedad inicial. El factor que se debe de vigilar deberá ser el tiempo de secado, pues a mayor cantidad de agua en la alimentación se deberá mantener por más tiempo el producto en la cámara de secado hasta alcanzar la humedad comercial final de 7.5 kg agua/100 kg producto. De tal manera que en el presente trabajo se decidió estimar la cantidad de aire de secado y en consecuencia su respectivo flujo (en m/s) a partir de la cantidad de agua a evaporar (Figura 6.1) y entonces establecer el tiempo de secado.

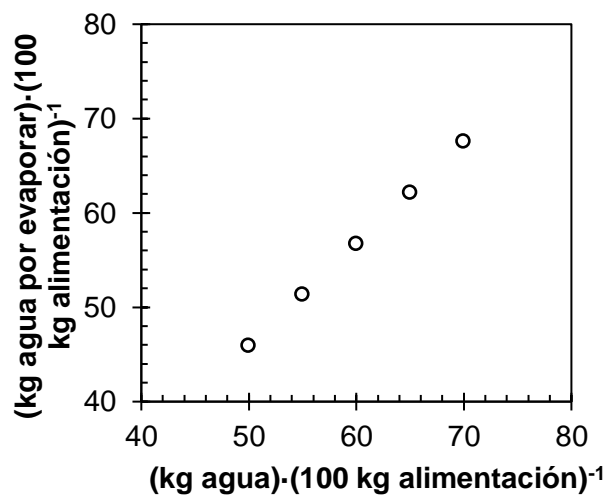


Figura 6.1 Cantidad de agua por evaporar en los granos de cacao fermentados para alcanzar una humedad final comercial de 7.5 kg agua/100 kg producto, en función de su humedad inicial (kg agua/100 kg alimentación).

6.2 Flujo mínimo del aire de secado para alcanzar la humedad final comercial del grano de cacao en función de las condiciones ambientales

Las condiciones climáticas influyen significativamente en el secado de los granos de cacao, principalmente la temperatura ambiente, que para la región de la Cuenca del Papaloapan va desde 25 hasta 55 °C según la temporada del año; así como la humedad relativa influye en el secado, que regularmente para esta misma región

está entre 70 y 90 %. Para obtener el resultado deseado en el secado de cacao fermentado (humedad final del producto: 7.5 % b.h.), el aire de secado debe ajustarse a ciertas condiciones para desempeñar su función (remover el agua libre del producto a secar); factores como la temperatura ambiente, humedad relativa ambiente, humedad relativa a 60 °C (temperatura de secado) y las humedades a la entrada y salida del secado se consideraron para determinar el flujo másico y lineal del aire de secado, así como el tiempo de secado para un lote inicial de 200 kg de granos de cacao fermentados.

6.2.1 Impacto de las condiciones ambientales sobre las humedades del aire de secado

El vapor de agua (humedad) es uno de los constituyentes del aire; se caracteriza por ser variable en cantidad de acuerdo con la disponibilidad de agua y de energía, y representa hasta un 4 % en volumen del aire. Este volumen es delimitado por la temperatura del ambiente: a mayor temperatura del aire hay mayor capacidad de retención de humedad. En otras palabras, el nivel de saturación del aire con vapor de agua incrementa con el aumento de la temperatura, por ejemplo, la cantidad de vapor de agua es mayor en una masa de aire caliente saturado (40°C, 100%) que en una de aire frío saturado (10 °C, 100%) (Jaramillo, 2005). Por lo tanto, en los procesos de secado debe considerarse que el aire de secado puede tener distintas humedades, y que esto dependerá fuertemente de las condiciones ambientales de la región donde se esté realizando el proceso.

Considerando dos principales condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa ambiente) se definió mediante carta psicrométrica la humedad del aire ambiental, que es equivalente a la humedad a la entrada del secador a 60 °C (y_1), y se estimó la humedad del aire al finalizar el proceso de secado de granos de cacao fermentados (y_2) considerando que se alcanzó la saturación del aire (ver datos en la Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Humedad del aire seco a la entrada del secador a 60 °C (y_1) considerando diferentes condiciones ambientales iniciales, y humedad del aire al finalizar el proceso de secado de granos de cacao fermentados (y_2) considerando saturación del aire.

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa ambiente (%)	Humedad relativa (%) a 60 °C	y_1 (kg agua/100 kg aire seco)	y_2 (kg agua/100 kg aire seco)
25	70	11.23	1.36	2.65
35		20.00	2.50	3.60
45		33.45	4.35	5.20
55		54.69	7.45	8.00
25	80	12.92	1.58	2.80
35		22.50	2.85	3.95
45		38.57	5.10	5.90
55		63.52	8.80	9.25
25	90	14.62	1.80	3.00
35		25.71	3.30	4.25
45		42.76	5.75	6.45
55		70.00	9.90	10.20

Los datos aquí reportados se buscaron en carta psicrométrica.

Los datos de la Tabla 6.1 muestran que, a humedad relativa constante y aumento de la temperatura ambiente, mayor humedad inicial en el aire de secado (y_1). Por lo contrario, se muestra que a una misma temperatura y una creciente humedad relativa ambiente (de 70 a 90%), la y_1 igualmente aumenta, pero no significativamente. Por lo que el factor que afecta mayormente la humedad inicial del aire que se utilizará para el proceso de secado es la temperatura ambiente. Esto se debe a que la humedad relativa es fuertemente proporcional a la temperatura y altamente sensible a sus cambios. Por lo tanto, es importante tener en cuenta y transferir a los productores de cacao que, si el día se encuentra nublado con una temperatura ambiente de 25 °C y humedad relativa de 90 %, y posteriormente aumenta la temperatura ambiente a 35 °C sin cambiar la humedad relativa, tendremos un incremento en la humedad inicial del aire de secado, lo que afectaría en la disminución de la capacidad del proceso de secado, es decir, habría una

menor disponibilidad para remover una mayor cantidad de agua. Por ende, la humedad específica es fuertemente dependiente de la temperatura ambiente y debe ser un factor importante que considerar para el proceso de secado.

Por otra parte, si la temperatura y la humedad inicial (kg agua/100 kg aire seco) del aire son estables en su sistema, su humedad relativa también lo será; entonces a medida que aumenta la temperatura, el aire se vuelve más seco (la humedad relativa disminuye); y al disminuir la temperatura, el aire se vuelve más húmedo (la humedad relativa aumenta), pero se conserva la misma cantidad de agua por unidad de aire seco (Jaramillo, 2005). Por ejemplo, si el ambiente está a 25 °C y 70 % de humedad relativa, y el sistema se calienta a 60 °C sin afectar su humedad específica, la humedad relativa entonces disminuye a 11.23 %. Esto precisamente es aprovechado en los procesos de secado, y es importante señalar al productor de cacao que esta es la razón de incrementar la temperatura en dichos procesos.

Finalmente, se consideró que el secado será eficiente, es decir, se alcanzará una saturación en el aire de secado (100% de humedad relativa); de esta forma fue posible estimar por carta psicrométrica la humedad específica del aire al finalizar el proceso de secado (y_2), que evidentemente experimentará un aumento por enriquecimiento con vapor de agua proveniente de los granos fermentados de cacao. Este último valor (y_2) junto con y_1 , fueron útiles para posteriormente obtener la masa total de aire de secado (Ec. 2), y que se necesita para poder remover la cantidad de agua que se reporta en la Figura 6.1.

6.2.2 Impacto de las condiciones ambientales sobre la entalpía de vaporización del agua en la interfase

La entalpía de vaporización del agua es la energía calorífica (kcal) necesaria para convertir 1 kg de agua líquida en vapor seco a la misma temperatura y presión (Severns *et al.*, 2021). La entalpía de vaporización es una de las propiedades termodinámicas más utilizadas en diferentes procesos de ingeniería, ya que permite simular, diseñar y optimizar procesos que involucren cambios de fase líquido-vapor como destilación, evaporación o secado (Perry *et al.*, 2001; Geankoplis, 2006;

Çengel y Ghajar, 2011; Fellows, 2018). En el presente trabajo fue necesario para estimar tiempos de secado (Ec. 4), así como determinar la energía necesaria para poder evaporar el agua de los granos de cacao y también para poder estimar el área de secado (Ec. 10).

Es importante señalar que después de remover agua, el aire de secado sufre una disminución de su temperatura, pues parte de la energía se ha cedido para promover el cambio de fase del agua en el producto. Si se considera que el aire ha alcanzado la saturación (100 % de humedad relativa), su temperatura final se denomina entonces temperatura de saturación, y en procesos de secado se considera que el producto alcanza dicha temperatura en su superficie. Las entalpías de vaporización del agua (λ_w) y su relación con diferentes temperaturas de saturación del gas de secado (T_w) se presentan en la Tabla 6.2, y fueron obtenidos mediante psicrometría.

Tabla 6.2 Entalpías de vaporización del agua (λ_w) a diferentes temperaturas de saturación del gas de secado (T_w) utilizado durante el procesamiento de granos de cacao fermentados, considerando diferentes condiciones ambientales iniciales.

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa ambiente (%)	T_w (°C) después del secado ^a	λ_w (kJ/kg)
25	70	29.33	2432.47
35		34.47	2420.27
45		40.81	2405.06
55		48.49	2386.62
25		80	30.26
35	36.00		2416.60
45	43.06		2399.66
55	51.09		2380.38
25	90	31.32	2427.83
35		37.20	2413.72
45		44.80	2395.48
55		56.08	2368.41

^aSe consideró que la T_w es igual a la temperatura superficial del grano de cacao durante el proceso de secado. Los datos aquí reportados se buscaron en carta psicrométrica.

Los resultados de la Tabla 6.2 nos muestran que, dependiendo de la humedad que tendremos en el ambiente, habrá una variación en la entalpía de vaporización y en las temperaturas de saturación que se alcanzan en el secado; por lo tanto, fueron considerados estos valores obtenidos para estimar el tiempo de secado (Ec. 4) y el área de secado (Ec. 10).

6.2.3 Impacto de las condiciones ambientales sobre el tiempo de secado y el flujo del aire de secado, a una humedad inicial fija de la alimentación

El tiempo de secado es de gran importancia por cuestiones económicas principalmente; y así como los demás factores importantes que se consideraron en el prototipo de secado propuesto, este también se ve afectado por las condiciones del medio ambiente.

Para estimar el tiempo de secado primero se consideró el flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador para alcanzar la humedad final comercial (7.5 kg agua/100 kg producto) G'' a partir de la Ec. (5), en relación de la cantidad de aire húmedo total a la entrada del secador (G' en kg aire) (Ec. 3) con el tiempo de secado (t , en s) en el período de velocidad constante (Ec. 4), a una humedad fija de 0.5 kg agua/kg alimentación, es decir, esta humedad representó una primera base de cálculo. Los datos estimados se reportan en la Tabla 6.3.

Como era de esperarse, a mayor contenido de humedad en el aire que rodea al secador (Tabla 6.1), el proceso de secado deberá prolongarse por más tiempo para alcanzar la humedad final comercial (Tabla 6.3). De tal forma que días con humedades relativas de 90% con temperaturas entre 45 y 55 °C deberán ser considerados como días críticos de secado pues el tiempo de proceso será mayor en comparación con el resto de las condiciones estudiadas en el presente proyecto. Debe considerarse que los tiempos reportados en la Tabla 6.3 son las horas efectivas en las que los granos de cacao son expuestos al aire a 60 °C. Por lo tanto, tiempos de más de 8 h son en realidad más de un día de proceso. En la Cuenca del Papaloapan las horas sol comprenden de 10 a 12 h, con picos máximos de radiación sostenidos durante 5 h, resultando en una radiación solar media de 5.12

kW·h/m²·día, según datos del Servicio Meteorológico Nacional recolectados entre mayo y agosto de 2021 a través de la estación CDALEMAN.

Tabla 6.3 Tiempo de secado y flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (G'') requeridos para alcanzar la humedad final comercial (7.5 kg agua/100 kg producto), considerando diferentes condiciones ambientales iniciales y una humedad inicial del cacao fermentado de 0.5 kg agua/kg alimentación.

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa ambiente (%)	Tiempo de secado (h) ^a	G'' (kg aire/s) ^b
25	70	8.03	0.250
35		9.60	0.248
45		12.69	0.247
55		21.02	0.237
25	80	8.27	0.257
35		10.20	0.234
45		14.34	0.234
55		27.05	0.228
25	90	8.57	0.253
35		10.72	0.259
45		15.96	0.242
55		61.17	0.153

^a Para estimar el tiempo de secado se aplicó la Ec. (4), donde se consideró la λ_w como una función de T_w .

^b Para estimar el G'' se resolvieron las Ecs. (2)-(5).

Posteriormente con los datos de la Tabla 6.3 se decidió estimar una velocidad lineal del aire de secado operativa (V en m/s) (Ec. 6), que fuese independiente de las condiciones ambientales iniciales. La concepción anterior se estableció por fines prácticos, pues de esta manera el productor sólo se deberá concentrar en fijar la potencia del motor del ventilador en la necesaria para alcanzar una velocidad del aire específica, que podría medirse fácilmente con un anemómetro. Los resultados de las estimaciones de la V se muestran en la Figura 6.2.

A partir de la relación de los datos de la variable dependiente V (m/s), con las variables independientes de las condiciones ambientales (temperaturas de 25-55 °C y humedades relativas de 70-90 %); se observó una línea de tendencia $y = -0.0176x + 1.2528$ (Figura 6.2). Esta tendencia indica que la velocidad lineal a una misma humedad del producto inicial (0.5 kg agua/kg alimentación, como base de cálculo), se mantiene a una velocidad promedio de 1.25 m/s. Es evidente que, para alcanzar la humedad final comercial a diferentes condiciones ambientales y una sola velocidad lineal del aire, se requieren distintos tiempos de proceso, como se expresa en la Tabla 6.3. Pero aun así resulta factible fijar la V a 1.25 m/s por las cuestiones prácticas citadas, además cabe resaltar que dicho valor está dentro del rango de velocidades técnicas reportadas en procesos de secado por convección forzada.

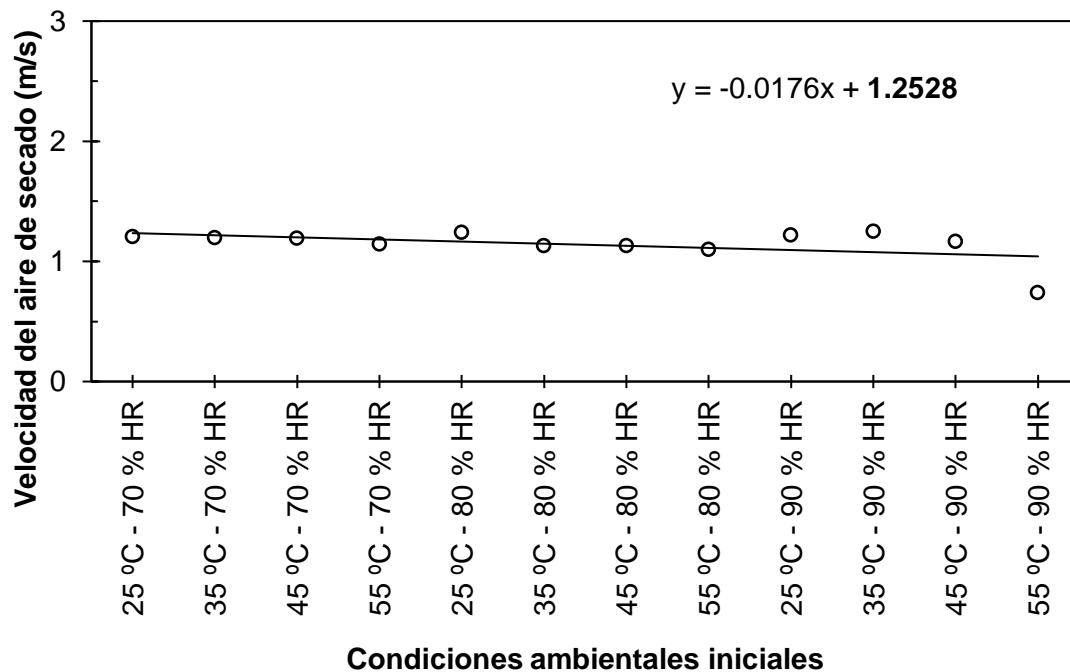


Figura 6.2 Velocidad del aire de secado para alcanzar una humedad final comercial de 7.5 kg agua/100 kg producto, en función de las condiciones ambientales iniciales. Las velocidades se estimaron a partir de la Ec. (6). Humedad inicial de los granos de cacao fermentados: 0.5 kg agua/kg alimentación. Diámetro de entrada al secador: 0.5 m. A partir de la ecuación de la recta, se define que la intercepción en el eje y es la velocidad lineal del aire de secado operativa que debe fijarse para el resto de las condiciones.

Una vez establecida la V (1.25 m/s), se decidió estimar el tiempo de secado a velocidad fija del aire de secado, pero distintas humedades iniciales del producto a secar, y distintas condiciones ambientales.

6.3 Efecto de las condiciones ambientales y la humedad en la alimentación sobre la tasa de evaporación y el tiempo de secado, a una velocidad del aire de secado fija

A partir de lo discutido en la sección anterior, primero a partir de la Ec. 6 se estimó G'' , que es el flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (kg aire/s), considerando ahora una V de 1.25 m/s. Entonces se estimó el flujo másico del aire seco a la entrada del secador (kg aire seco/s) a partir de la relación descrita por la Ec. 7: G/G' , que representa la fracción de aire seco del entorno (kg aire seco/kg aire), es decir, lo inverso a la humedad del aire; y G'' . Cabe señalar que la expresión descrita por la Ec. 7 permite mantener una relación directa con las distintas condiciones ambientales evaluadas en el presente proyecto. Después la tasa de secado o de evaporación (m , en kg agua/s) se pudo estimar a partir de la Ec. 8 y en consecuencia el tiempo de secado con la Ec. 9, la cual permite estimarlo en función de las diferentes humedades que puede poseer el grano de cacao (0.50-0.70 kg H₂O/kg alimentación) y de la tasa de secado (m) que se consigue a una velocidad lineal específica, en este caso 1.25 m/s. En las Figuras 6.3 y 6.4 se muestran los valores de las m y de los tiempos de secado, respectivamente, obtenidos a diferentes condiciones ambientales iniciales y a las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados.

En el campo de secado, la cantidad de agua por evaporar es importante para estimar el consumo de energía del secador y el tiempo de secado, o las capacidades técnicas del secador durante su diseño (capacidad térmica, volumen de la cámara, velocidad del aire de secado), de tal manera que se logran definir elementos que sirven de términos de comparación entre los diferentes secadores, como la eficiencia térmica de secado y que se define así: “relación entre la cantidad de

energía destinada y la cantidad de agua evaporada durante el proceso” (Perry *et al.*, 2001; Pardhi y Bhagoria, 2013). Así que los datos reportados en la Figura 6.3 pueden ser utilizados posteriormente para el diseño de otros secadores como el de charolas, que en un momento de mayor producción de cacao pudiese ser útil para el productor de la Cuenca del Papaloapan.

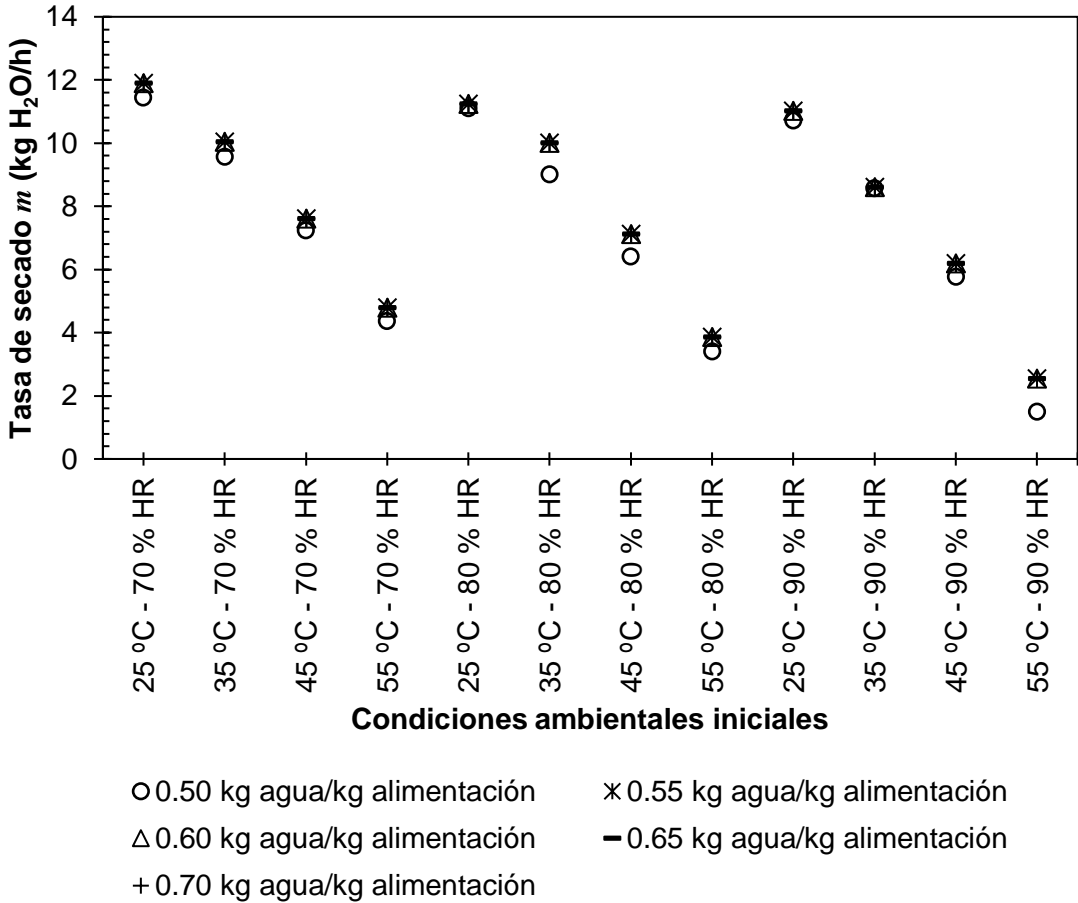


Figura 6.3 Tasas de secado (m) en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H₂O/kg alimentación). Las m se estimaron a partir de la Ec. (8) considerando una $V = 1.25$ m/s.

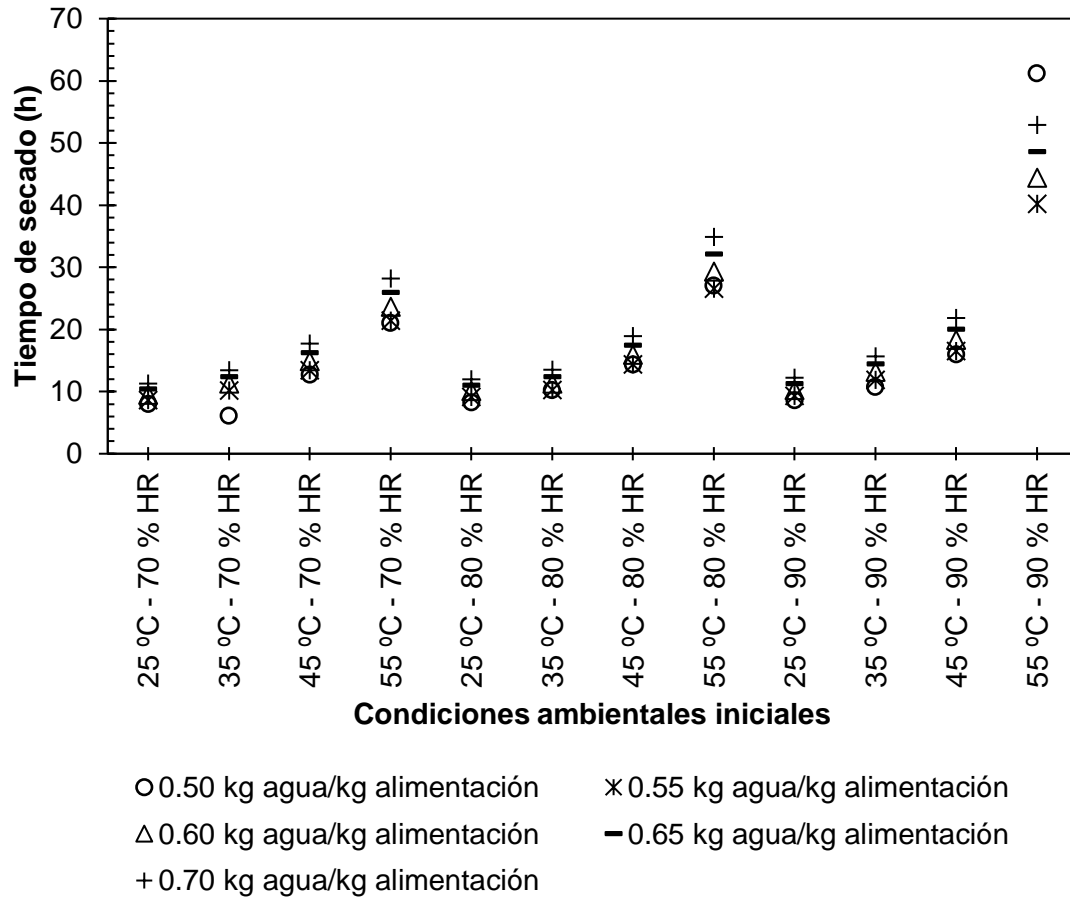


Figura 6.4 Tiempos de secado en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H₂O/kg alimentación). Los tiempos de secado se estimaron a partir de la Ec. (9) considerando una $V = 1.25 \text{ m/s}$ y m variables.

El consumo de energía por unidad de agua evaporada varía con diversos parámetros, de ellos, los más importantes son: la variación de la humedad del producto durante el secado (curvas de secado), la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo, las condiciones ambientales y el tipo de secador. A su vez, la tasa de secado de sólidos está en función de la temperatura de secado, del flujo de gas de secado, del contenido de humedad inicial de la alimentación y de las propiedades psicrométricas del entorno (Perry *et al.*, 2001; Geankoplis, 2006). Como se observa en la Figura 6.3, para los intervalos de temperatura ambiente y humedad relativa

evaluados, los cambios de la temperatura ambiente a una sola humedad relativa influyen mayormente sobre la tasa de secado; mientras que, a una misma temperatura ambiental, los cambios en la humedad relativa y en las humedades iniciales de los granos de cacao no afectan significativamente la tasa de secado. Por lo que el tiempo de secado estimado aumenta conforme se incrementa la temperatura del ambiente a una sola humedad relativa (Figura 6.4), es decir, la humedad del ambiente (Tabla 6.1) afecta notablemente los tiempos de secado, lo cual es congruente con lo reportado en trabajos experimentales y la termodinámica del sistema aire-vapor de agua.

A partir de los resultados reportados en la Figura 6.4, es importante indicarles a los productores que cuando la temperatura ambiental y la humedad relativa superen los 45 °C y el 70 %, respectivamente, se debe considerar no proceder con el secado del material, pues representaría un tiempo muy prolongado de proceso y resultaría en la afectación de la calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial del producto.

6.4 Estimación del área de contacto entre el gas de secado y el lecho de granos de cacao fermentados

La operación de secado implica el desplazamiento del vapor de agua desde una superficie saturada, a través de una delgada capa de aire estático, hasta la corriente principal del aire. Durante esta fase, la velocidad de secado depende de la velocidad de transferencia de calor, de forma que la temperatura de la superficie del producto se mantiene constante. Los factores que controlan la velocidad de transferencia de masa durante el periodo de velocidad constante son: 1) la diferencia en temperatura, o contenido en agua, entre el aire y la superficie de desecación, 2) los coeficientes de transferencia de calor y masa, y 3) el área de la superficie de secado (Perry *et al.*, 2001; Geankoplis, 2006; Fellows, 2018).

En este contexto, es importante señalar que en el presente trabajo la temperatura de secado se fijó en 60 °C (T) de acuerdo con lo recomendado para granos de cacao, y en la Tabla 6.2 se reportan las temperaturas de saturación del gas de

secado (T_w) obtenidas bajo distintas condiciones ambientales iniciales mediante datos psicrométricos. Las T_w se consideraron iguales a la temperatura superficial del grano de cacao, y se utilizaron para localizar las λ_w en tablas termodinámicas. Por otra parte, Páramo-Calderón *et al.* (2010) reportan coeficientes de transferencia de calor y masa obtenidos a partir de datos experimentales para granos de cacao con y sin cáscara, tratados a 40 o 60 °C, y diferentes velocidades de aire (0.5-2.0 m/s). Así que para estimar el área de contacto entre el gas de secado y el lecho fijo de granos de cacao, que representa la superficie de secado, se procedió a resolver la Ec. (10), para ello se utilizó el coeficiente de transferencia de calor (h) reportado por Páramo-Calderón *et al.* (2010), así también se utilizaron las tasas de secado reportadas en la Figura 6.3, las λ_w reportadas en la Tabla 6.2, y las diferencias entre la T y las T_w . Los resultados obtenidos se reportan en la Figura 6.5.

Como se muestra en la Figura 6.5, y como se esperaba, el área de secado es independiente de las condiciones ambientales iniciales y del contenido inicial de agua en el producto a secar. Se destaca que estos datos estimados están en función de la cantidad de agua por evaporar y la cantidad de aire por utilizar para conseguirlo, debido a que se conciben las distintas tasas de secado a partir de la Ec. (8) y éstas se introducen en la Ec. (10); la cual considera características térmicas como λ_w , h y ΔT ; entonces el área de secado se estima bajo distintas dinámicas de secado. Por otra parte, los fenómenos de encogimiento generalmente presentados en procesos de secado se descartan por la naturaleza física de la presente muestra. Esto nos lleva a afirmar que es posible delimitar o fijar el área de secado con los datos presentados en la Figura 6.5.

En la Tabla 6.4 se reportan las áreas de secado obtenidas a partir de la Ec. (10) considerando la regresión lineal de la tendencia observada en la Figura 6.5, así como la mediana y la media de los 60 datos estimados. Debido a que bajo condiciones ambientales de 55 °C y 90 % HR existen datos que distorsionan la tendencia, se podría fijar el área entre 8.10 y 8.81 m². Además, como se ha comentado anteriormente, bajo las condiciones ambientales citadas no se recomienda llevar el proceso de secado por los tiempos de secado tan prolongados que involucran.

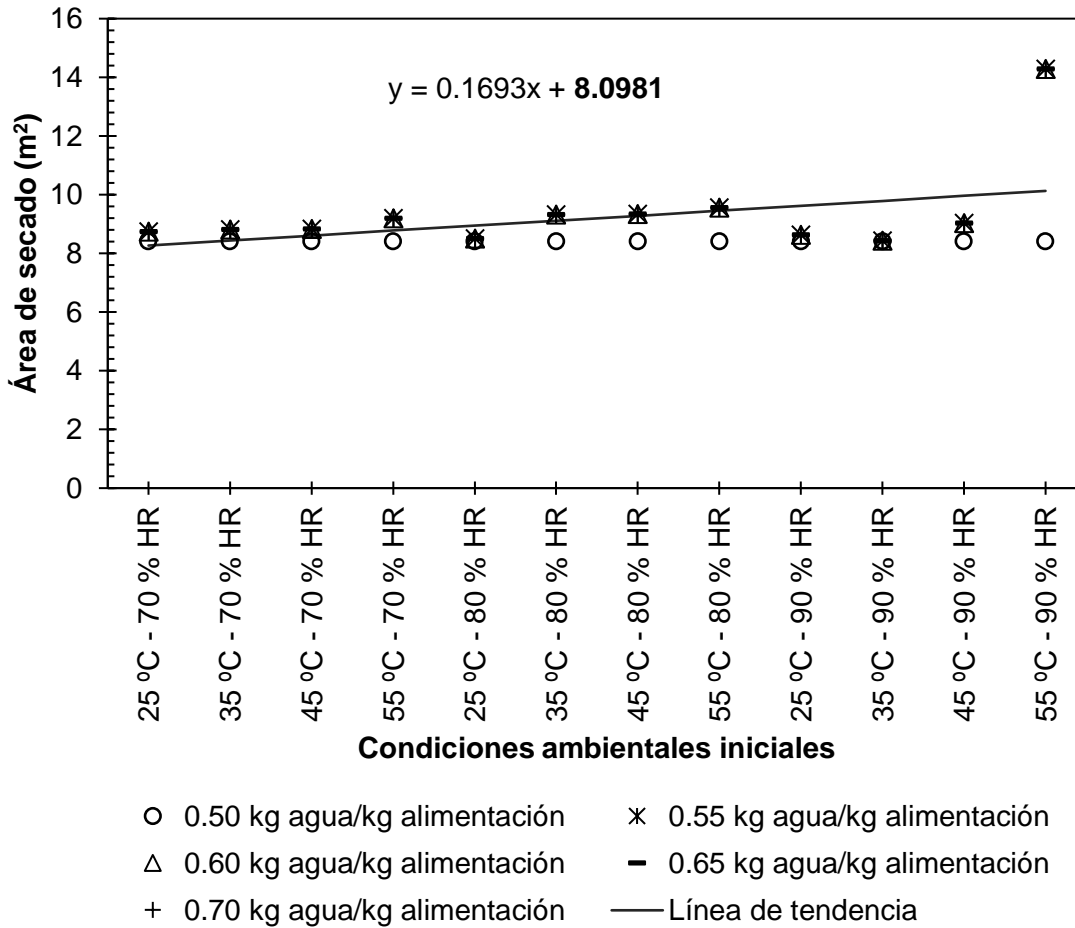


Figura 6.5 Áreas de secado en función de las condiciones ambientales iniciales y de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H₂O/kg alimentación). Las áreas de secado se estimaron a partir de la Ec. (10) considerando m variables.

Tabla 6.4 Área de contacto entre el gas de secado y el lecho fijo de granos de cacao fermentados estimada a partir de los datos obtenidos ($n = 60$) mediante la Ec. (10).

Fuente del valor	Área de secado (m ²)
A partir de la línea de tendencia (Fig. 6.5)	8.10
Mediana	8.81
Media	9.20

6.5 Estimación de la cantidad de energía necesaria para calentar el aire de secado

La cantidad de energía necesaria para calentar el aire de secado que funcionará como removedor de la masa de agua de los granos de cacao, se estimó por balance de energía mostrado en la Ec. (11). Los resultados se representan en la Figura 6.6 como una dependencia de las condiciones ambientales que rodearían el secador y de las cantidades de agua que podría contener la muestra.

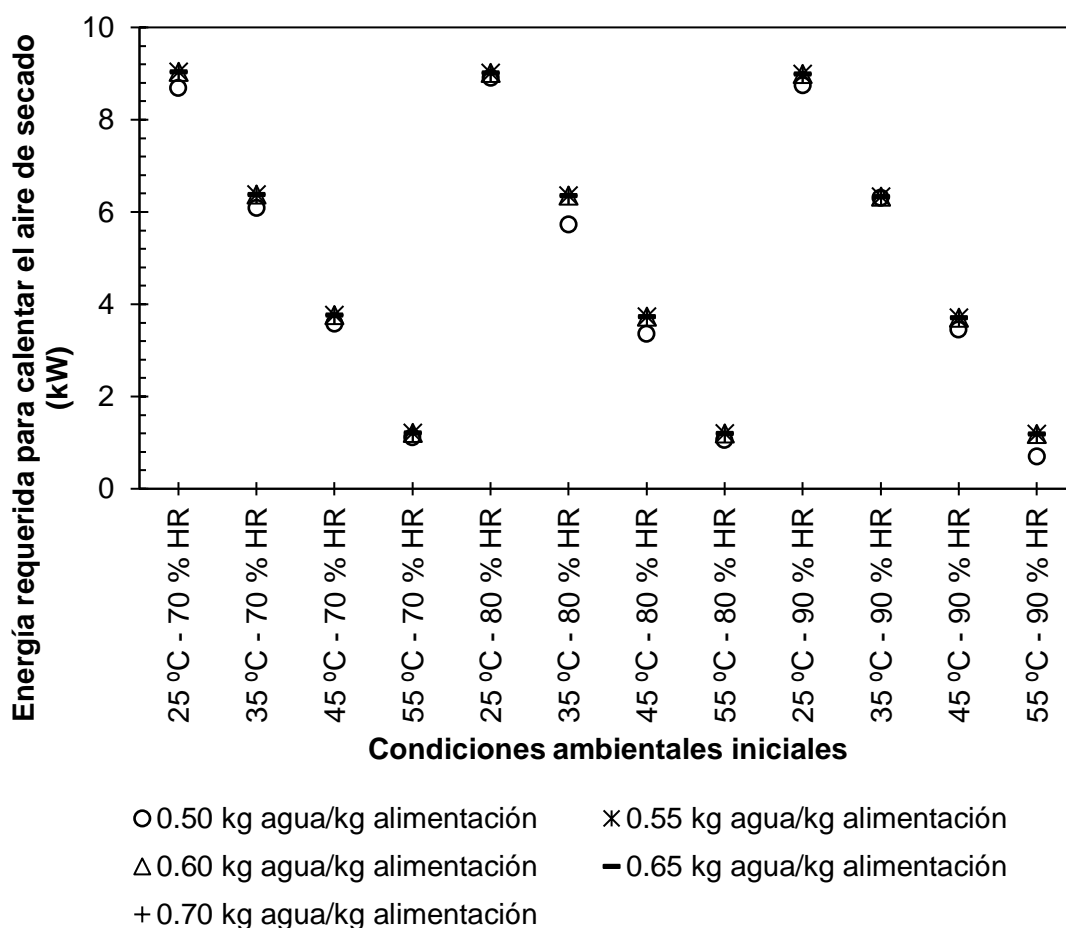


Figura 6.6 Energía requerida para calentar el aire de secado desde temperatura ambiente (25-55 °C) hasta la temperatura de operación (60 °C), en función de las distintas humedades que pueden poseer los granos de cacao fermentados (0.50-0.70 kg H₂O/kg alimentación). Las energías en forma de calor se estimaron a partir de la Ec. (11).

El comportamiento de los datos de la energía requerida para calentar el aire de secado muestra una significativa dependencia con la temperatura ambiente, y una independencia con la humedad relativa ambiental y con la humedad del grano de cacao. Se confirma entonces que, al aumento de la temperatura ambiente, se requiere menor cantidad de energía para calentar el aire, lo cual tiene sentido con las leyes de la termodinámica.

Para la remoción del agua contenida en los granos de cacao se requiere de calor latente de evaporación (cantidad de calor agregado a una sustancia para producir un cambio de fase, en este caso para vaporización), en esa transición de fase la superficie del lecho alcanza una temperatura de equilibrio. Así que considerando esto, la cantidad de calor proveída hacia la superficie del lecho fijo de granos de cacao desde el aire circulante de secado debe ser igual al calor o energía aprovechado para el cambio de fase (Perry *et al.*, 2001).

Entonces, para fines de comparación y validación de resultados de la Ec. (11) se decidió estimar la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua de los granos de cacao manteniendo constante el área de contacto entre el gas de secado y los granos de cacao, a través de la Ec. (12), que considera el coeficiente de transferencia de calor por convección para este producto, y que fue reportado por Páramo-Calderón *et al.* (2010). Se decidió también considerar las distintas áreas de secado reportadas en la Tabla 6.4. Finalmente, se calculó el error estándar relativo entre los resultados de la Ec. (11) y la Ec. (12). Los 60 datos obtenidos se reportan en la Figura 6.7. Teniendo en cuenta que, valores del error estándar relativo por debajo del 10% se consideran viables (Vázquez-León *et al.*, 2019), los resultados de las Figuras 6.7(a) y 6.7(b), demuestran valores viables, es decir, los datos obtenidos por las Ecs. (11) y (12) se consideran similares. Por lo tanto, áreas de secado de 8.10 y 8.81 m² se consideran como valores de diseño para fijar las dimensiones de las charolas de secado.

Es importante destacar que mientras la Ec. (11) considera propiedades termodinámicas del aire, la Ec. (12) toma en cuenta las propiedades termodinámicas del lecho de los granos de cacao. Además, los errores relativos promedios que se

obtuvieron permiten dar validez a todos los cálculos aquí reportados. El planteamiento matemático aquí desarrollado no se limita a este producto, mientras se conozcan las propiedades termodinámicas del sistema aire-vapor de agua y del producto a secar, es posible tomar esta secuencia de cálculos para estimar: tasa de secado, velocidad de aire de secado, tiempo de secado, área de secado, y energía requerida para llevar a cabo el proceso.

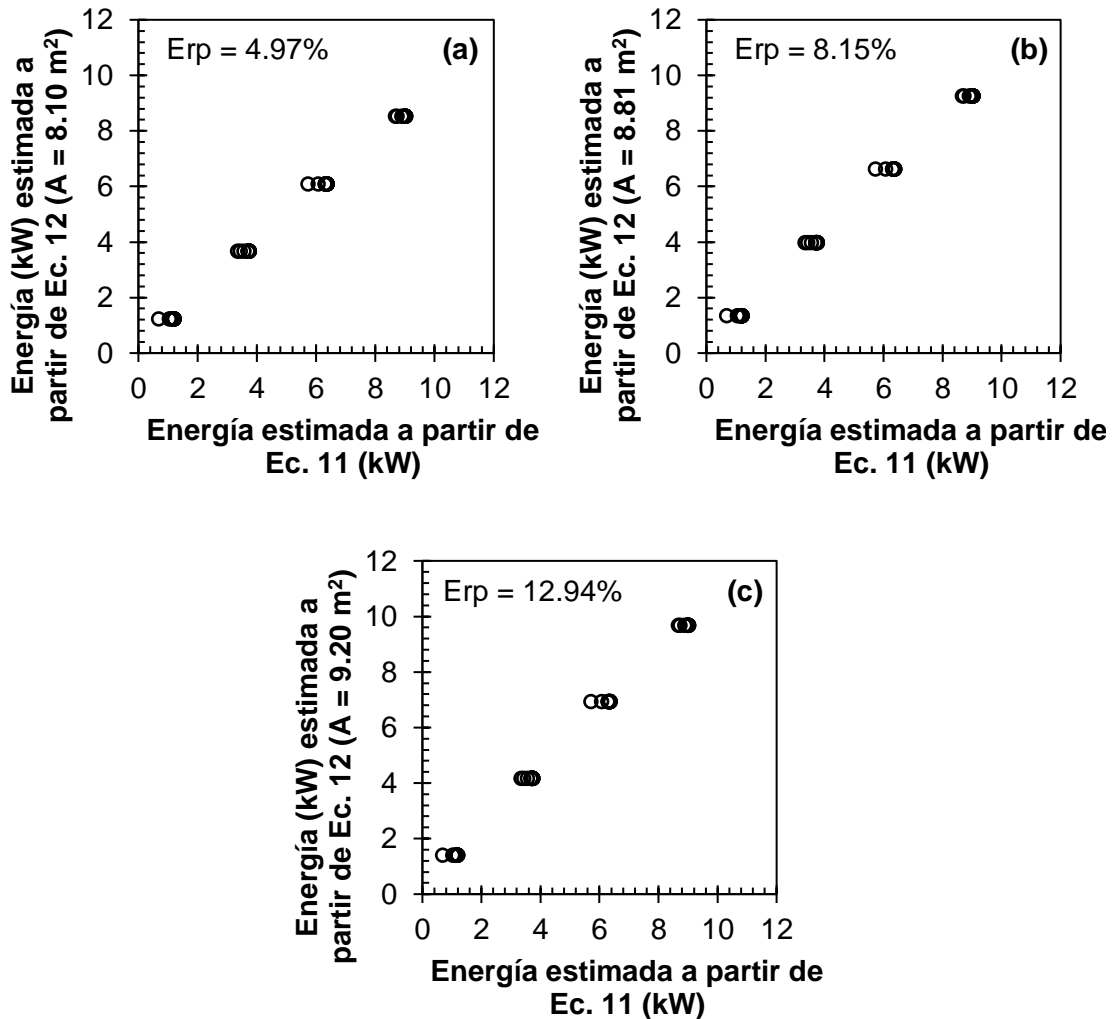


Figura 6.7 Errores relativos promedios de las energías requeridas para calentar el aire de secado desde temperatura ambiente (25-55 °C) hasta la temperatura de operación (60 °C) estimadas mediante la Ec. (11) *versus* las energías estimadas a partir de la Ec. (12), considerando distintas áreas de secado: 8.10 m² (a), 8.81 m² (b) y 9.20 m² (c). ($n = 60$).

6.6 Recomendaciones de construcción del secador solar tipo habitación

Los materiales utilizados para la construcción del secador solar tipo habitación deberán ser económicos y fáciles de obtener en el mercado local. Las Figuras 6.8 - 6.11 muestran los componentes que debe poseer el secador recomendados después de una revisión de diferentes equipos, los cuales consisten en el colector solar (calentador y entrada del aire de secado), ventilador, alerones tipo persianas y mesas de secado; y que se describen a continuación.

6.6.1 Mesas de secado

Se determinó a partir de los cálculos mostrados anteriormente que el área de secado debe ser de por lo menos $8.10-8.80 \text{ m}^2$ para garantizar un secado eficiente del lote a procesar de 200 kg de granos de cacao fermentados, indistintamente de su contenido inicial de humedad. Así que se tomó el valor más alto como factor de diseño (Figura 6.8).

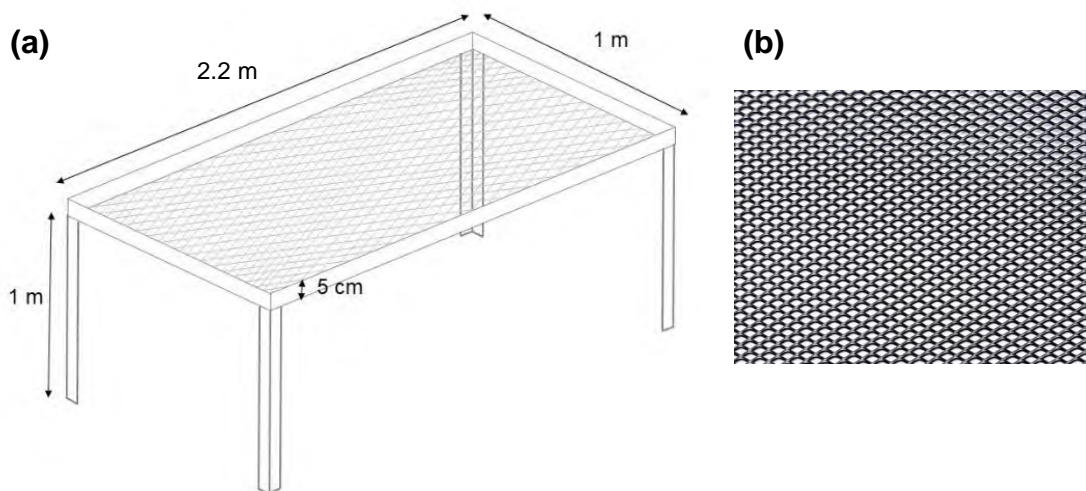


Figura 6.8 Dimensiones de las mesas de secado (a) para granos de cacao fermentados y acercamiento de la malla de acero inoxidable (b) recomendada como plancha de la mesa.

Se recomienda que las mesas de secado estén formadas con planchas de acero inoxidable perforadas, con la finalidad de asegurar la inocuidad y el secado total de las semillas de cacao. Se debe determinar el calibre suficiente para que cuenten con la capacidad de procesar 200 kg de semillas de cacao distribuidos en 4 mesas de 2.2 m² cada una (Figura 6.8), esto bajo las recomendaciones técnicas de este tipo de producto. La estructura de soporte de cada mesa se recomienda que se construyan con perfiles de acero inoxidable o aluminio (para facilitar la limpieza y desinfección). Se debe proponer un diseño de mesa que permita el ensamble de otra mesa por encima, con el fin de aumentar la producción en una siguiente etapa. Es importante señalar que la velocidad de secado y la energía requerida para este cambio deberán recalcularse.

6.6.2 Dimensiones, características particulares y distribución del secador solar tipo habitación

Para la construcción del secador solar tipo habitación, se deben tomar en cuenta las siguientes condiciones: orientación de las ventanas y la inclinación del techo hacia el sur con la finalidad de captar de manera eficiente los rayos solares, y recomendaciones sobre el tipo de suelo, topografía, composición del piso, drenaje del piso (para un mejor lavado y mejores condiciones de higiene) e iluminación en concordancia con las NOM-008-ZOO-1994; WCS, 2005; y NOM-025-STPS-2008.

La cimentación, la estructura de las paredes y del techo del secador solar tipo habitación deberán levantarse con materiales de construcción disponibles en el mercado local. Se recomienda utilizar vidrio para las ventanas y acrílico transparente para el techo distribuidos de acuerdo con las Figuras 6.9 y 6.10, para garantizar la mayor captación de radiación solar posible. Estas decisiones de diseño son tomadas debido a que se desea aprovechar al máximo la energía del medio exterior.

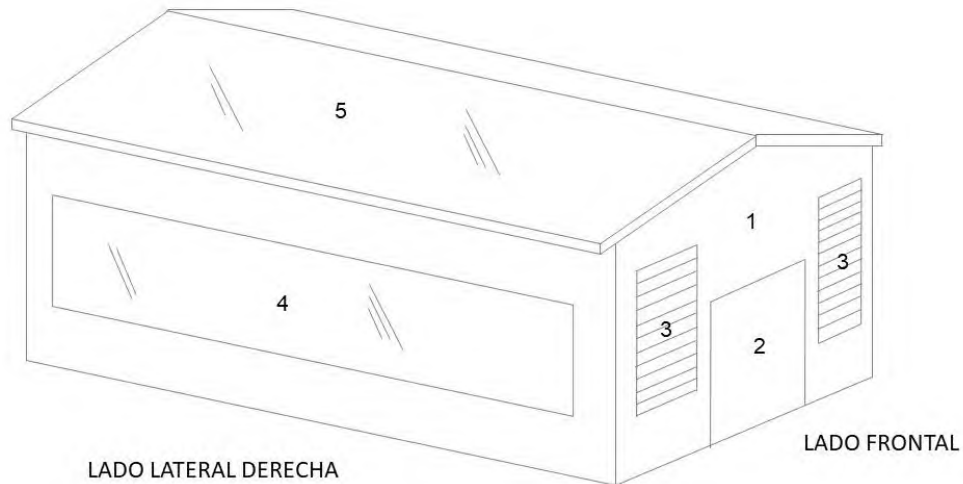


Figura 6.9 Vista lateral derecha y frontal del secador solar tipo habitación. Acotaciones: 1, habitación general; 2, entrada del personal; 3, alerón tipo persiana ajustable de acero inoxidable para salida del aire de secado; 4, ventana de vidrio; 5, techo de acrílico.

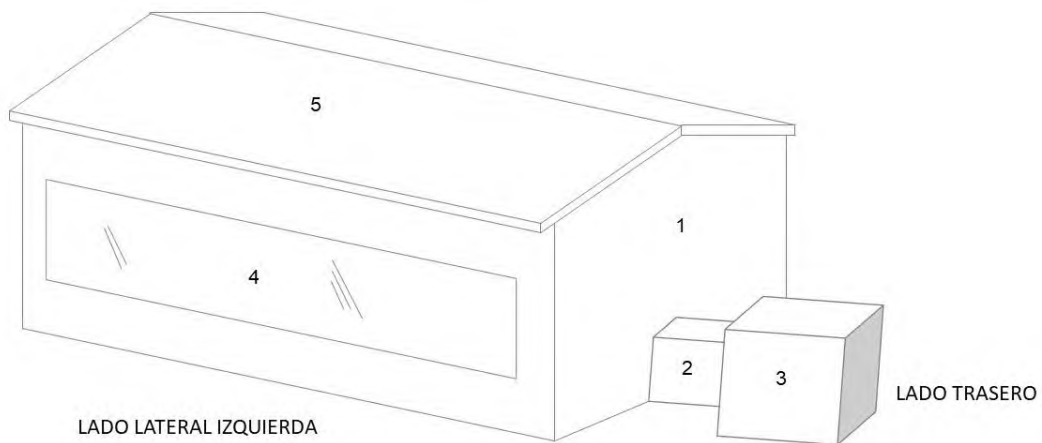


Figura 6.10 Vista lateral izquierda y trasera del secador solar tipo habitación. Acotaciones: 1, habitación general; 2, ubicación del ventilador equipado con variador de frecuencia; 3, zona de captación de radiación solar y entrada del aire de secado; 4, ventana de vidrio; 5, techo de acrílico.

Como fuente adicional de calor se podrían instalar resistencias eléctricas en la zona de entrada del aire de secado (ver Figuras 6.9 y 6.10), que podrían combinarse con un área de captación de radiación solar, para hacerlo funcionar en días nublados en los que no se alcance la temperatura de operación u operarlo durante la noche para tener una producción en continuo. Estas resistencias deberán ser capaces de entregar las energías estimadas y reportadas en las Figuras 6.6 o 6.7. Para impulsar el aire caliente y para remover el aire saturado, se recomienda que se instale un ventilador (Figura 6.11b), que a su vez se pueda controlar el flujo de aire de modo que éste sea envolvente en la habitación, y además circule eficientemente para disipar el calor y la humedad a través de persianas (Figura 6.11a) colocadas en el extremo opuesto a la entrada de aire (Figuras 6.9 y 6.10).

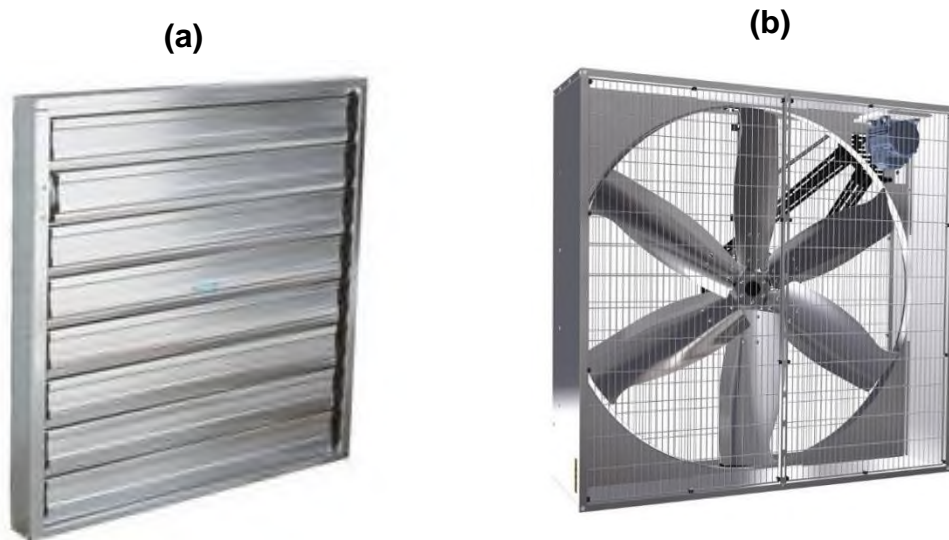


Figura 6.11 Alerón tipo persiana ajustable de acero inoxidable para instalación agrícola (a) y ventilador para instalación agrícola (b). Fuente: AGRIEXPO [En línea], 2020.

Otra de las variables de diseño importante es el área de captación de radiación solar (A_c), en este proyecto se decidió estimar este parámetro en función de una eficiencia térmica del 40 % utilizando la Ec. (14), la cual considera la energía necesaria para calentar el aire de secado (\dot{Q}) y la radiación solar media de la Cuenca del

Papaloapan. En la Figura 6.12 se representan las A_c estimadas *versus* \dot{Q} . Debido a que estos últimos valores dependen fuertemente de las condiciones ambientales se ve una variación importante en el A_c , aunque la tendencia es directamente proporcional tal como se esperaba. Debido a que rara vez se alcanzan temperaturas de 25 °C, o bien sólo se presentan durante las primeras horas del día, los valores de A_c alrededor de 50 m² podrían descartarse. De tal forma que el A_c podría fijarse en 40 m² (Ver Figura 6.12). Por otra parte, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, el techo se recomienda que sea de acrílico transparente para que se permita la captación de radiación solar a través del mismo. Por lo tanto, si consideramos una distribución como se muestra en la Figura 6.13 y las dimensiones citadas de las mesas, la habitación deberá contar con una dimensión de 4×8 m, es decir, el A_c de la habitación sería de 32 m². Así que la zona de captación de radiación solar adicional que se muestra en la Figura 6.13 deberá ser de por lo menos 8 m².

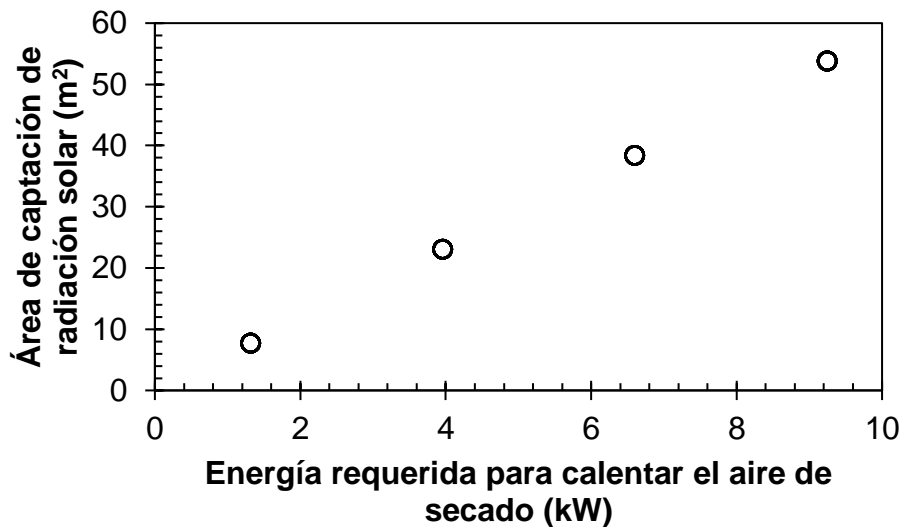


Figura 6.12 Área de captación de radiación solar en función de la energía requerida para calentar el aire de secado. Las áreas fueron estimadas a partir de la Ec. (14). ($n = 60$).

Lado superior

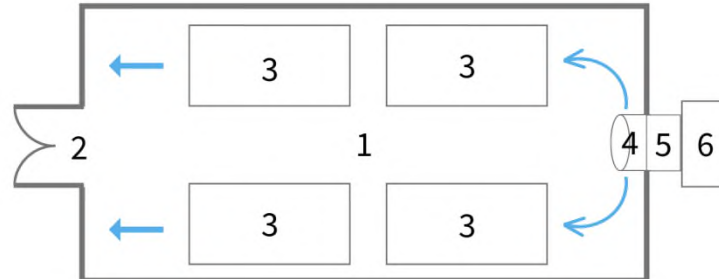


Figura 6.13 Distribución del interior del secador solar tipo habitación. Acotaciones: 1, habitación general; 2, entrada del personal; 3, mesas de secado; 4, ubicación del ventilador equipado con variador de frecuencia; 5, ducto de dirección del aire de secado; 6, zona de captación de radiación solar y entrada del aire de secado.

7 Conclusiones

A través del conocimiento de las propiedades termodinámicas del sistema aire-vapor de agua y de los granos de cacao fermentados, así como de las humedades iniciales y finales de los granos de cacao, fue posible calcular las variables de diseño de un secador solar, tales como: energía requerida para calentar el aire de secado, área de captación de radiación solar, velocidad del aire de secado, tasas de secado, tiempo de secado, área de contacto entre el aire de secado y la muestra. Así mismo, a partir del conocimiento adquirido sobre diseño de plantas durante la licenciatura y reforzando con una revisión técnica de suministros en el entorno, fue posible realizar recomendaciones de construcción para garantizar un proceso de secado que alcance a cubrir las variables de diseño aquí estimadas. La secuencia de cálculos aquí planteada se puede utilizar para estimar variables de diseño de otros productos agroalimentarios, siempre y cuando se conozcan las propiedades termodinámicas y las propiedades fisicoquímicas aquí utilizadas.

El secador solar tipo invernadero, cumple su función importante en el beneficiado de semillas de cacao, el ofrecer un producto final con condiciones necesarias para la comercialización deseada aprovechando las condiciones ambientales de la región del Papaloapan; y a su vez se reduce considerablemente la inversión inicial, el uso de energía eléctrica y mantenimiento del secador propuesto. Haciendo así, el proceso de secado de semillas de cacao, amigable y rentable con el medio ambiente, ideal de acuerdo con las necesidades y demandas de los productores de la Cuenca del Papaloapan del programa social "Producir para Conservar Tuxtepec", y también para cualquier interesado en este sector.

8 Referencias

- Aguilar, C. (2020). El secado del cacao. En Nicaragua *Cacao Móvil*. Recuperado 12 de enero de 2023 de <https://cacaomovil.com/site/guide/cosecha-fermentacion-y-secado-del-cacao/42/el-secado-del-cacao>
- Arvelo-Sánchez, M.Á., González-León, D., Maroto-Arce, S., Delgado-López, T., y Montoya-Rodríguez, P. (2017). Manual Técnico del Cultivo de Cacao: Prácticas Latinoamericanas. San José, Costa Rica: *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6181>
- Barbecho-Guallas, A.F., y Loja-Juca, J.C. (2019). Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura. Tesis de Licenciatura. *Universidad Politécnica Salesiana*, Cuenca, Ecuador. Depositada en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17131/1/UPS-CT008186.pdf>
- Bardales, J., Barrera Gurbillón, M.A., y Oliva-Cruz, M. (2021). Comparación de prototipos innovadores para el secado de cacao nativo fino de aroma (*Theobroma cacao* L.) y su posibilidad de adopción. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(3), 20-33. <http://dx.doi.org/10.25127/aps.20213.815>.
- BIOPAT. (2015). Cacao (*Theobroma cacao*). En *Comisión Nacional contra la Biopiratería*. Perú. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/09/06.-BOLETIN_N5_CACAO.pdf
- Çengel, Y.A., y Ghajar, A.J. (2011). Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones: Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar (4a. ed.--.). México DF: *McGraw Hill*.
- Cros, E., y Jeanjean, N. (1995). Cocoa quality: effect of fermentation and drying. *Plantations, Recherche, Développement (France)*, 24, 25-27.
- Cubillos, G., Merizalde, G.J., y Correa, E. (2008). Manual de beneficio del cacao 2008: para técnicos, profesionales del sector agropecuario y productores. Medellín, Antioquia, Colombia: *Secretaría de Agricultura de Antioquia*. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/manual_beneficio_cacao.pdf
- Dalpasquale, V.A., Marcal de Queiroz, D., Marques, J.A., y Sinicio, R. (1991). Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas. Santiago, Chile: *Oficina regional de la FAO para América Latina y El Caribe*. <https://www.fao.org/3/x5058s/x5058S00.htm#Contents>
- Delgado, O.J., Molina, H.J.B., Chaves, L.C., Romanazzi, G., y Paparella, A. (2021). El papel de los hongos en la cadena productiva del cacao y el desafío del

- cambio climático. Revista de Hongos 7, núm. 3: 202.
<https://doi.org/10.3390/jof7030202>
- Dias, J., y Ávila, M. (1993). Influencia do sistema de secagem na acidez das amendoas do cacau (*Theobroma cacao* L.). *Agrotrópica*, 5(1), 19-24.
- directindustry.com. (2023). Hot air dryer DRYER FLACONI 4500. En *Chiossi e Cavazzuti SRL*. Recuperado el 12 de enero de 2023 de <https://www.directindustry.com/prod/chiossi-e-cavazzuti-srl/product-191456-2270591.html>
- Dubón, A. (2016). Protocolo para el Beneficiado y Calidad del Cacao. La Lima, Cortés, Honduras: *Centro de Comunicación Agrícola de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA)*. http://aprocacaho.com/wp-content/uploads/2016/11/protocolo-para-el-beneficiado-y-calidad-del-cacao_lq-min.pdf#:~:text=El%20proceso%20de%20beneficiado%20del%20cacao%20se%20inicia,realizando%20la%20cosecha%20cada%20quince%20d%C3%ADas%20o%20menos.
- Efrain, P., Pezoa-García, N.H., Jardim, D.C.P., Nishikawa, A., Haddad, R., y Eberlin, M.N. (2010). Influence of cocoa beans fermentation and drying on the polyphenol content and sensory acceptance. *Food Science and Technology*, 30, 142-150. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000500022>
- Fellows, P.J. (2018). Tecnología del procesado de los alimentos: principios y prácticas: *Editorial Acribia*.
- Geankoplis, C.J. (2006). Procesos de transporte y principios de procesos de separación (incluye operaciones unitarias). *CECSA Editorial México*.
- Ghosh, B.N., y Cunha, J. (1975). Effect of season on sun drying of cocoa beans in Brazil. *Turrialba*, 25(4), 396-403.
- Hashim, P., Selamat, J., Muhammad, K., y Ali, A. (1999). Effect of drying time, bean depth and temperature on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentrations of Malaysian cocoa beans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(7), 987-994. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(19990515\)79:7<987::AID-JSFA314>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(19990515)79:7<987::AID-JSFA314>3.0.CO;2-H)
- Janjai, S. (2012). A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *International journal of energy and environment*, 3(3), 383-398. https://www.ijee.ieefoundation.org/vol3/issue3/IJEE_05_v3n3.pdf
- Jaramillo, R.A. (2005). 7. La humedad del aire. En H.F. Ospina (Ed.), *Clima andino y café en Colombia* (pp. 192). Colombia: CENICAFE. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/859/9/7.%20Humedad%20aire.pdf>

- Nogales, J. (2022). Métodos de secado de cacao. En Venezuela *Poscosecha Cacao*. Recuperado el 12 de enero de 2023 de <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/08/metodos-de-secado-de-cacao.html>
- Nogales, J., Graziani de Fariñas, L., y Ortiz de Bertorelli, L. (2006). Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical*, 56, 5-20. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000100001&lng=es&tlng=es
- Ocampo-Brondo, E.G., Ríos-Barba, J.I., y Soria-Luna, Z.B. (2012). La Producción de Cacao en México. En *Facultad de Contaduría y Administración - UNAM*. México. <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/12/la-produccion-del-cacao-en-mexico.pdf>
- OECD. (2023). Cocoa beans, whole or broken, raw or roasted. En A.J.G. Simoes y C.A. Hidalgo(Eds.), *The Observatory of Economic Complexity (OEC): An analytical tool for understanding the dynamics of economic development*. Recuperado el 09 de enero de 2023 de <https://oec.world/en/profile/hs/cocoa-beans-whole-or-broken-raw-or-roasted>
- Ogata, N. (2007). El cacao. *CONABIO. Biodiversitas*, 75, 1-5. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/7185.pdf>
- Palini, y Alves. (2023). En Brasil *Máquinas Agrícolas*. Recuperado el 12 de enero de 2023 de https://www.palinalves.com.br/imgs/pasr_3_g.pdf
- Páramo-Calderón, D., García-Alamilla, P., Salgado-Cervantes, M.A., Robles-Olvera, V.J., Rodríguez-Jimenes, G.C., y García-Alvarado, M.A. (2010). Mass transfer of water and volatile fatty acids in cocoa beans during drying. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2010.02.028>
- Pardhi, C.B., y Bhagoria, J.L. (2013). Development and performance evaluation of mixed-mode solar dryer with forced convection. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 23. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-23>
- Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O., y Arrébola, L.A. (2001). Manual del ingeniero químico (Vol. 2). Madrid, España: *McGraw-Hill Madrid*.
- Ramos, G. (2004). La fermentación, el secado y almacenamiento del cacao. *taller internacional de calidad integral de cacao teoría y práctica. Quevedo-Ecuador*.
- Rodriguez-Campos, J., Escalona-Buendía, H.B., Orozco-Avila, I., Lugo-Cervantes, E., y Jaramillo-Flores, M.E. (2011). Dynamics of volatile and non-volatile compounds in cocoa (*Theobroma cacao* L.) during fermentation and drying processes using principal components analysis. *Food Research International*, 44(1), 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.028>

- SADER. (2020). Cacao el alimento de los Dioses. En *Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER)*. México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-cacao-el-alimento-de-los-dioses?idiom=es>
- SAGARPA. (2017). Cacao Mexicano. En SAGARPA (Ed.), *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030* (pp. 16). Ciudad de México, México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256425/B_sico-Cacao.pdf
- Selamat, J., y Mordingah Harun, S. (1994). Formation of methyl pyrazine during cocoa bean fermentation. *Pertanika*, 17, 27-27.
- Severns, W.H., Degler, H.E., y Miles, H. (2021). La producción de energía mediante vapor, aire o gas. México: *Reverté Mexicana*.
- Shanghai Tianhe Pharmaceutical Machinery Co., L. (2023). En C.C. Chenjia Town, Shanghai Recuperado el 12 de enero de 2023 de <http://en.sthpm.com/product/53.html>
- SIAP. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. En *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*. Recuperado el 09 de enero de 2023 de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Solórzano, C.Y.E., Franco, K.J.B., García, D.A.T., Escobar, Á.O.F., Navarrete, Y.G.T., y Chang, J.F.V. (2021). Efecto de la fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.), variedad nacional y trinitario, en cajas de maderas no convencionales sobre la calidad física y sensorial del licor de cacao. *Revista de Investigación Talentos*, 8(2), 42-55. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.2.153>
- Valdivia, R. (2015). Fundamentos del secado del cacao. En *Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Archivo multimedia*. Venezuela. <https://cacaofcaug.files.wordpress.com/2015/08/fundamentos-del-secado-del-cacao.pdf>
- Vázquez-León, L.A., Olgún-Rojas, J.A., Páramo-Calderón, D.E., Palma, M., Barbero, G.F., Robles-Olvera, V.J., García-Alvarado, M.A., y Rodríguez-Jimenes, G.C. (2019). Modeling of counter-current multistage extraction of *Moringa oleifera* leaves using a mechanistic model. *Food and Bioprocess Processing*, 115, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.04.003>
- Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D., y Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 66(3), 239-254. <http://www.alanrevista.org/ediciones/2016/3/art-10/>

Anexo A

Análisis dimensional de las ecuaciones utilizadas

Cantidad de agua a evaporar:

$$M = Fx_i - F(1 - x_i) \frac{x_o}{1 - x_o} \quad (1)$$

Donde:

M : masa total de agua por evaporar (kg)

F : masa de la alimentación (granos fermentados de cacao por procesar: 200 kg)

x_i : fracción másica de agua de la alimentación en la entrada del secador (0.500-0.700)

x_o : fracción másica de agua de la alimentación en la salida del secador (0.075).

Cálculo de la masa total de aire de secado (kg) (Geankoplis, 2006):

$$G(y_2 - y_1) = F(1 - x_i)(x_1 - x_2) \quad (2)$$

Donde:

G : masa total de aire seco utilizado en el proceso de secado (kg)

y_1 : humedad en base seca del aire a la entrada del secador (kg H₂O/kg aire seco)

y_2 : humedad en base seca del aire a la salida del secador (kg H₂O/kg aire seco)

$F(1 - x_i)$: masa de sólidos secos en la alimentación (kg sólidos secos)

x_1 : humedad en base seca de los granos de cacao a la entrada del secador ($x_i/(1 - x_i)$, en kg H₂O/kg sólidos secos)

x_2 : humedad en base seca de los granos de cacao a la salida del secador ($x_o/(1 - x_o)$, en kg H₂O/kg sólidos secos).

De la Ec. (2) se deduce que la cantidad de aire húmedo a la entrada del secador (G' en kg aire):

$$G' = G + Gy_1 \quad (3)$$

Cálculo del tiempo de secado (t , en s) (Fellows, 2018):

$$t = \frac{\rho_{d\beta} \lambda_w L (x_1 - x_2)}{h(T - T_w)} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_{d\beta}$: densidad de los granos secos de cacao (700 kg/m³)

λ_w : entalpía de vaporización a temperatura de bulbo húmedo (J/kg)

L : espesor medio del lecho de secado limitado por el grosor medio del grano de cacao (0.017 m)

x_1 : humedad en base seca de los granos de cacao a la entrada del secador (1.000 kg H₂O/kg sólidos secos, equivalentes a 50 % H b.h.)

x_2 : humedad en base seca de los granos de cacao que se desea a la salida del secador (0.081 kg H₂O/kg sólidos secos)

h : coeficiente de transferencia de calor en la interfase (30 W/m² °C)

T : temperatura de bulbo seco del aire de secado (60 °C)

T_w : temperatura de bulbo húmedo del aire de secado

$$G'' = G' / t \quad (5)$$

Velocidad lineal del aire de secado (V en m/s) según la siguiente expresión:

$$V = \frac{G''}{\rho_\gamma \pi r^2} \quad (6)$$

Donde

V : velocidad del aire húmedo en m/s a la entrada del secador solar

G'' : caudal másico de aire de secado en kg/s

ρ_γ : densidad del aire de secado a 60 °C y 1 atm (1.059 kg/m³)

r : radio del ventilador o ducto = 0.25 m.

Flujo másico del aire seco a la entrada del secador (G/t , en kg aire seco/s):

$$G/t = (G/G')(G'') \quad (7)$$

Donde:

G/G' : fracción de aire seco en el aire del entorno (kg aire seco/kg aire)

G'' : flujo másico del aire húmedo a la entrada del secador (kg aire/s)

Tasa de secado o de evaporación (m , en kg agua/s):

$$m = (M/G)(G/t) \quad (8)$$

Tiempo de secado (t):

$$t = M/m \quad (9)$$

Equilibrio entre la tasa de transferencia de calor hacia el producto alimenticio y la tasa de pérdida de masa desde el producto alimenticio (Fellows, 2018):

$$m = \frac{hA(T-T_w)}{\lambda_w} \quad (10)$$

Donde:

h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor en la interfase o superficie (30 W/m² °C)

T : temperatura de bulbo seco del aire de secado (60 °C)

T_w : temperatura de saturación del aire de secado estimada por sicrometría

λ_w : entalpía de vaporización a la T_w correspondiente (J/kg)

m : tasa de secado (kg agua/s) a 60 °C de los granos de cacao fermentados, Ec. (8)

Cantidad de energía necesaria para calentar el aire (\dot{Q} en W) (Çengel y Ghajar, 2011):

$$\dot{Q} = (G/t)c_p(T - T_i) \quad (11)$$

Donde:

G/t : caudal másico de aire seco a la entrada del secador (kg aire seco/s)

c_p : calor específico del aire (1007 J/kg °C)

T : temperatura de secado (60 °C)

T_i : temperatura media del aire en el ambiente que rodea al secador solar

Área de contacto entre el gas de secado y los granos de cacao (A , en m²) (Çengel y Ghajar, 2011):

$$\dot{Q} = hA(T - T_i) \quad (12)$$

Donde:

h : coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfaz del grano de cacao (30 W/m²K, (Páramo-Calderón *et al.*, 2010))

Error estándar relativo entre los resultados obtenidos por la Ec. (11) y la Ec. (12) (Vázquez-León *et al.*, 2019):

$$Erp (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Me_i - Mp_i|}{Me_i} \quad (13)$$

donde

Me_i y Mp_i : valores de energía estimados a partir de las Ecs. (11) y (12)

N : número de datos experimentales

Eficiencia de una máquina térmica (η) (Pardhi y Bhagoria, 2013):

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{IA_c} \quad (14)$$

Donde:

η : 0.4 como máximo para máquinas térmicas reales

\dot{Q} : energía necesaria para calentar el aire de secado

A_c : área efectiva de captación de la radiación solar

I : índice de radiación solar que para la Cuenca del Papaloapan es en promedio de 430.4 W/m²

Anexo B

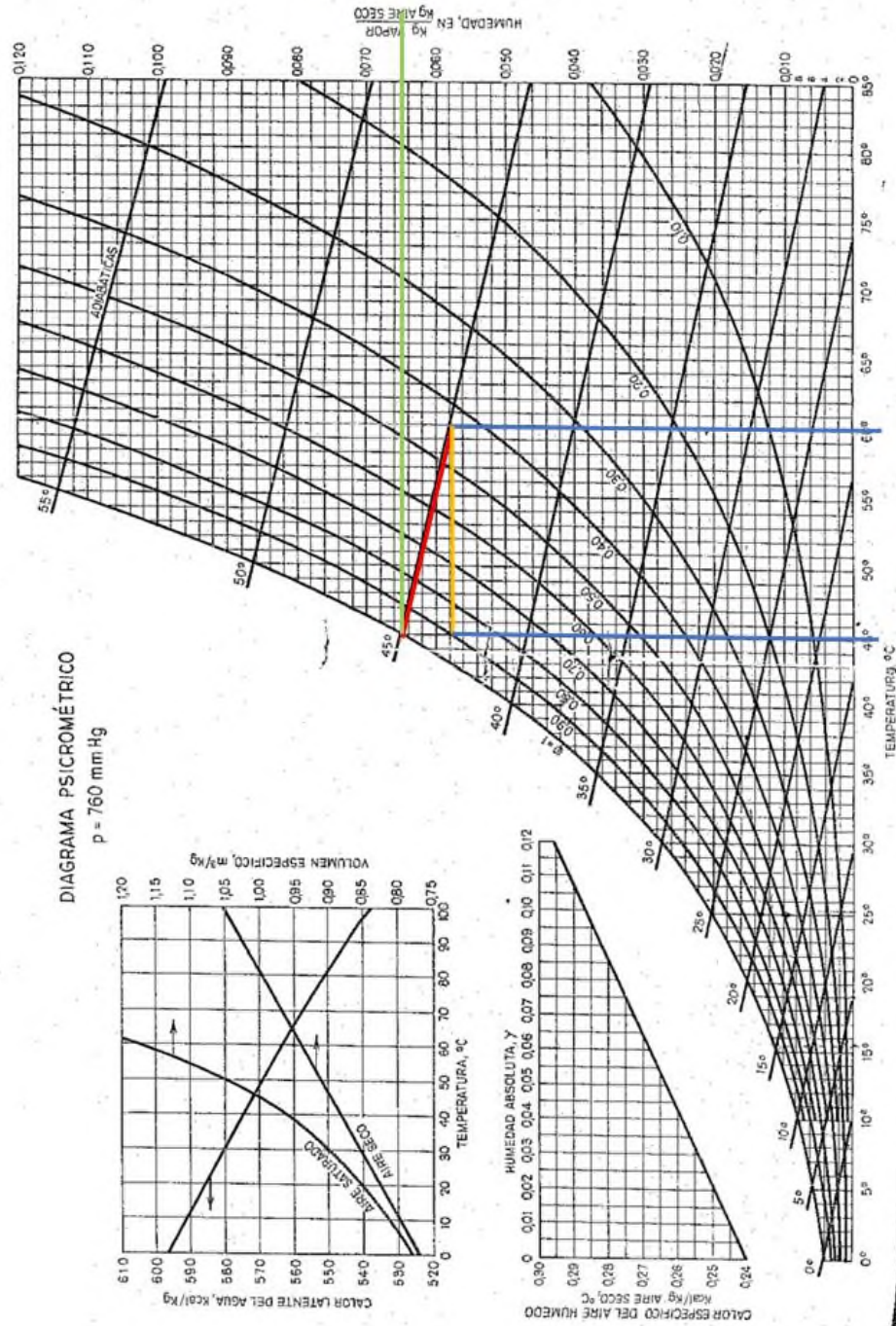


Figura 8.1 Diagrama psicrométrico estándar, a p=760 mm Hg. Para estimar la temperatura de saturación del aire de secado (T_w) (línea verde), a partir de las temperaturas iniciales y finales del secado (líneas azules), llevado a saturación (línea roja).