



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA  
LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (*PRUNUS PERSICA*, (L.) BATSCH.)  
EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ**

**Noé Estuardo Calel Jiatz**

Asesorado por Inga. Hilda Piedad Palma Ramos

Guatemala, junio de 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA  
LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (*PRUNUS PERSICA*, (L.) BATSCH.)  
EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**NOÉ ESTUARDO CALEL JIATZ**

ASESORADO POR LA INGA. HILDA PIEDAD PALMA RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (*PRUNUS PERSICA*, (L.) BATSCH.) EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 4 de febrero de 2020.

**Noé Estuardo Calel Jiatz**



Guatemala, 28 de octubre de 2020

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "Diseño y construcción de un secador solar híbrido experimental para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*, (L.) Batsch.) en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Noé Estuardo Calel Jiatz, quien se identifica con el registro académico 2010-20480 y con el CUI 2601 98749 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Inga. Hilda Piedad Palma Ramos  
ASESORA  
Ingeniera Química  
Colegiado Activo No. 453  
**INGA. HILDA PALMA DE MARTINI**  
**COLEGIADO No. 453**



Guatemala, 03 de febrero de 2021.  
Ref. EIQ.TG-IF.005.2021.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **060-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

#### INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Noé Estuardo Calel Jiatz.**

Identificado con número de carné: **2601987490101.**

Identificado con registro académico: **201020480.**

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (Prunus persica, (L.) Batsch.) EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Hilda Piedad Palma Ramos de Martini, profesional de la Ingeniería Química**

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Jorge Emilio Godínez Lemus  
profesional de la Ingeniería Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



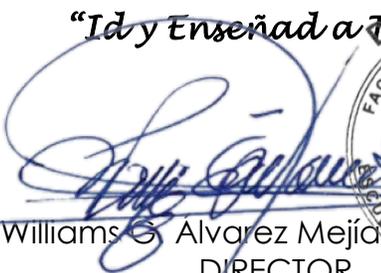
Guatemala, 26 de mayo de 2021.  
Ref. EIQ.098.2021

**Aprobación del informe final del trabajo de graduación**

Ingeniera  
Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (*Prunus persica*, (L.) Batsch.) EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ** del(la) estudiante Noé Estuardo Calel Jiatz, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

*“Id y Enseñad a Todos”*



Ing. Williams G. Alvarez Mejía, M.Sc., M.L.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo  
WGAM/mpea



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS  
QUÉDATE EN  
CASA**

DTG. 233.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO EXPERIMENTAL PARA LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE DURAZNO (PRUNUS PERSICA, (L.) BATSCH.) EN EL MUNICIPIO DE SAN BARTOLOMÉ MILPAS ALTAS, SACATEPÉQUEZ**, presentado por el estudiante universitario: **Noé Estuardo Calel Jiatz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, junio de 2021.

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por hacerme oír gozo y alegría; y regocijar estos huesos que había quebrantado.
- Mis abuelos** Mercedes Güitz, Eulalio Jiatz, Petronila Sut y Nicolás Calel; que en paz descansen. Por guiarme con sus palabras hacia el buen camino. Su esfuerzo y sacrificio permitió que yo naciera con mayores oportunidades y privilegios.
- Mis padres** Juan Calel y María Ana Jiatz. Por enseñarme a construir, sembrar y apreciar la vida. Su disciplina e instrucción están siempre conmigo.
- Mis hermanos** Hans y Ana Orquídea Calel. Por atender a mis palabras cuando más los he necesitado.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por financiar mi educación.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de estudiar y avanzar hacia mis aspiraciones.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por equiparme con el conocimiento necesario para trabajar y funcionar en la sociedad.
<b>Inga. Hilda Palma</b>	Por su apoyo constante al asesorar el presente trabajo de graduación, y su dedicación en los cursos que imparte.
<b>Cooperativa Integral de Producción “San Bartolomé” R.L.</b>	Por permitir la realización del presente trabajo de graduación, y por su importante labor comunitaria.
<b>Mis amigos</b>	Diego Estrada, Antonio Tobar y Marcela Sotoj. Por permitirme conocerlos y acompañarme en varios momentos importantes de mi vida.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Secado .....	5
2.1.1. Deshidratación de alimentos.....	6
2.1.2. Procesos adicionales al secado para materias orgánicas .....	7
2.1.3. Pre-tratamientos de bajo costo para deshidratación de frutas y vegetales .....	8
2.1.4. Curvas de secado.....	10
2.1.5. Circulación del gas de secado.....	14
2.1.6. Psicrometría del proceso de secado.....	15
2.2. Secador de alimentos.....	19
2.2.1. Secador solar.....	20
2.2.2. Secador solar híbrido.....	22
2.3. Durazno ( <i>Prunus persica</i> (L.) Batsch.) .....	23
2.3.1. Especificaciones de secado.....	24

2.4.	Condiciones climáticas del municipio de San Bartolomé	
	Milpas Altas.....	24
2.4.1.	Temperatura.....	25
2.4.2.	Radiación incidente .....	26
2.4.3.	Humedad.....	27
2.4.4.	Dirección y velocidad del viento .....	28
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Localización .....	31
3.2.	Variables .....	31
3.3.	Delimitación de campo de estudio .....	32
3.4.	Recursos humanos disponibles .....	32
3.5.	Recursos materiales disponibles.....	33
3.6.	Técnicas cuantitativas de la investigación.....	34
3.6.1.	Balance de masa y energía.....	34
3.6.2.	Análisis de transferencia de masa.....	39
3.6.3.	Criterios de diseño .....	40
3.6.4.	Dimensiones y construcción del secador .....	43
3.6.5.	Pruebas de secado .....	44
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información.....	46
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	77
3.9.	Análisis estadístico.....	122
3.9.1.	Análisis factorial .....	123
3.9.2.	Análisis de varianza .....	123
4.	RESULTADOS.....	127
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	145

CONCLUSIONES .....	151
RECOMENDACIONES .....	153
BIBLIOGRAFÍA.....	155
APÉNDICES .....	161



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Gráficas típicas del contenido total de humedad y de la velocidad de secado frente al tiempo de secado.....	11
2.	Gráfica típica de velocidad de secado en función del contenido de humedad .....	12
3.	Carta psicrométrica de Grosvenor para temperaturas medias del sistema aire-agua.....	18
4.	Secador solar tipo armario .....	22
5.	Promedio de temperaturas altas y bajas a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas.....	25
6.	Promedio de temperatura en función del día y hora, a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas .....	26
7.	Promedio de radiación incidente diaria en un metro cuadrado de superficie a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas.....	27
8.	Nivel de humedad a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas ..	28
9.	Velocidad promedio del viento a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas.....	29
10.	Dirección del viento a lo largo del año en San Bartolomé Milpas Altas....	29
11.	Diagrama de balance de masa y energía del secador .....	36
12.	Diseño del secador solar híbrido experimental sección transversal frontal .....	128
13.	Diseño del secador solar híbrido experimental vista de planta .....	129
14.	Diseño del secador solar híbrido experimental sección lateral.....	130

15.	Contenido de humedad en función del tiempo de secado .....	134
16.	Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo. ....	136
17.	Velocidad de secado en función del tiempo.....	140
18.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad .....	142
19.	Tiempo de secado hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad.	143
20.	Punto crítico de secado .....	144

## TABLAS

I.	Variables de investigación .....	31
II.	Ecuaciones de balance de masa y energía para el secador.....	38
III.	Datos de criterios y suposiciones para el diseño del secador.....	42
IV.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 1 .....	46
V.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 2.....	48
VI.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 3.....	49
VII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 4.....	50
VIII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 5.....	52
IX.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 6.....	54
X.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 7 .....	55
XI.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 8.....	56
XII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 9.....	57
XIII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 10.....	59
XIV.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 11 .....	59
XV.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 12.....	61
XVI.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 13.....	61
XVII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 14.....	63
XVIII.	Datos de la prueba de secado solar, repetición 15.....	64
XIX.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 1 .....	65

XX.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 2 .....	65
XXI.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 3 .....	67
XXII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 4 .....	68
XXIII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 5 .....	69
XXIV.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 6 .....	70
XXV.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 7 .....	70
XXVI.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 8 .....	71
XXVII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 9 .....	72
XXVIII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 10 .....	73
XXIX.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 11 .....	74
XXX.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 12 .....	74
XXXI.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 13 .....	75
XXXII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 14 .....	76
XXXIII.	Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 15 .....	76
XXXIV.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 1 .....	78
XXXV.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 2 .....	80
XXXVI.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 3 .....	81
XXXVII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 4 .....	82
XXXVIII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 5 .....	84
XXXIX.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 6 .....	86
XL.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 7 .....	87
XLI.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 8 .....	89
XLII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 9 .....	90
XLIII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 10 .....	91
XLIV.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 11 .....	91
XLV.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 12 .....	93
XLVI.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 13 .....	93
XLVII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 14 .....	95
XLVIII.	Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 15 .....	96

XLIX.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 1.....	97
L.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 2.....	98
LI.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 3.....	99
LII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 4.....	100
LIII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 5.....	101
LIV.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 6.....	102
LV.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 7.....	102
LVI.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 8.....	103
LVII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 9.....	104
LVIII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 10.....	105
LIX.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 11.....	106
LX.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 12.....	107
LXI.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 13.....	107
LXII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 14.....	108
LXIII.	Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 15.....	109
LXIV.	Contenido de humedad en función del tiempo de secado solar .....	110
LXV.	Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo para el método de secado solar .....	112
LXVI.	Velocidad de secado en función del tiempo para el método de secado solar .....	113
LXVII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad para el método de secado solar.....	116
LXVIII.	Contenido de humedad en función del tiempo de secado híbrido .....	117
LXIX.	Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo para el método de secado híbrido.....	118
LXX.	Velocidad de secado en función del tiempo para el método de secado híbrido .....	119
LXXI.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad para el método de secado híbrido .....	120

LXXII.	Tiempos de secado hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad para las pruebas de secado solar .....	121
LXXIII.	Tiempos de secado hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad para las pruebas de secado híbrido .....	122
LXXIV.	Experimento de un factor para el tiempo de secado de rodajas de durazno ( <i>Prunus persica</i> ) hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad en función del método de secado.....	123
LXXV.	Análisis de varianza de un factor para el tiempo de secado de rodajas de durazno ( <i>Prunus persica</i> ) hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad en función del método de secado .....	125
LXXVI.	Áreas de transferencia del secador solar híbrido experimental.....	127
LXXVII.	Contenido de humedad en función del tiempo de secado.....	131
LXXVIII.	Modelo matemático y coeficiente de correlación del contenido de humedad en función del tiempo de secado.....	134
LXXIX.	Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo. ....	135
LXXX.	Modelo matemático y coeficiente de correlación del aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo.....	137
LXXXI.	Velocidad de secado en función del tiempo .....	137
LXXXII.	Modelo matemático y coeficiente de correlación de la velocidad de secado en función del tiempo.....	140
LXXXIII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad .....	141
LXXXIV.	Modelo matemático y coeficiente de correlación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad .....	142
LXXXV.	Tiempo de secado hasta 0.4286kg/kg <sub>seco</sub> de contenido de humedad	143
LXXXVI.	Punto crítico de secado.....	144



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b><math>\omega</math></b>	Contenido de humedad
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación estándar
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>°F</b>	Grado Fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>K</b>	Kelvin
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kJ</b>	Kilo joule
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>lb</b>	Libra
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minuto
<b>Pa</b>	Pascal
<b>%</b>	Porcentaje
<b><math>\bar{X}</math></b>	Promedio
<b>s</b>	Segundo
<b>T</b>	Temperatura
<b>t</b>	Tiempo
<b>Btu</b>	Unidad térmica británica
<b>W</b>	Vatio



## **GLOSARIO**

<b>Área de transferencia</b>	Área superficial a través de la cual tiene lugar un fenómeno de transporte: momento, calor, masa, o una combinación.
<b>Contenido de humedad</b>	Cantidad de agua presente en un sólido, como madera, suelo, o similar. Se puede expresar en base seca o en base húmeda.
<b>Curva de secado</b>	Representación gráfica de varios parámetros durante el proceso de secado, con el fin de caracterizarlo.
<b>Deshidratación</b>	Reducción de contenido de humedad en un sólido. Sinónimo de secado, pero más utilizado para referirse a procesos con alimentos.
<b>Irradiancia</b>	Flux de potencia de energía radiante por unidad de área.
<b>Pretratamiento</b>	Proceso aplicado al material de entrada del proceso principal, con el fin de facilitar este último o hacerlo más efectivo.

<b>Psicrometría</b>	Campo de la ingeniería que estudia las propiedades físicas y termodinámicas de las mezclas gas-vapor. Comúnmente aplicado a la mezcla aire-vapor de agua.
<b>Punto crítico de secado</b>	En una curva de secado es el punto en que la velocidad comienza a decaer marcadamente, después de un periodo de velocidad constante.
<b>Punto de rocío</b>	Temperatura a la cual el aire se debe enfriar para llegar a saturarse con su contenido de humedad. Si se enfría más allá de este punto, el vapor de agua se comienza a condensar.
<b>Secado</b>	Proceso de transferencia de masa consistente en la reducción del contenido de humedad o de otro solvente, por evaporación de un sólido o líquido.
<b>TBH</b>	Temperatura de bulbo húmedo. La temperatura más baja a que se puede llegar debido únicamente a la evaporación de agua, a determinadas condiciones de temperatura y contenido de humedad del aire.
<b>Velocidad de secado</b>	Razón de cambio del contenido de humedad removido en función del tiempo durante un proceso de secado.





## RESUMEN

En la presente investigación se diseñó y construyó una unidad experimental de secado híbrido solar-eléctrico; y se realizaron pruebas de secado con este, para deshidratar rodajas de durazno (*Prunus persica*), funcionando solamente con energía solar, y funcionando con energía solar y eléctrica, para comparar el tiempo de secado, curvas de secado, temperaturas y puntos críticos de cada método.

Estimando una carga de materia prima de 1 kg y usando criterios de diseño basados en antecedentes se determinaron las dimensiones del secador por medio de un balance de masa y energía, y un análisis de transferencia de masa. Luego se construyó el secador según las dimensiones determinadas y se utilizó para realizar pruebas de secado, con los resultados se dibujaron las curvas de secado de contenido de humedad y velocidad de secado en función del tiempo, y velocidad en función del contenido de humedad, así como el aumento de temperatura del aire de secado en función del tiempo. También se realizó un análisis de varianza para determinar si la reducción en el tiempo de secado al utilizar secado híbrido, respecto del secado solar, es significativa.

Se determinó que durante el secado híbrido se alcanzan mayores temperaturas y mayores velocidades de secado que durante el solar, que el tiempo de secado promedio hasta  $0,4286 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad es de 10,426 horas para el secado solar, y 6,011 horas para el secado híbrido, y que esta diferencia de tiempo es estadísticamente significativa. También se observó que el punto crítico fue muy similar para ambos tipos de secado.



## OBJETIVOS

### General

Diseñar y construir un secador solar híbrido experimental para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez.

### Específicos

1. Diseñar una unidad de secado solar híbrida experimental para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez.
2. Construir un secador solar híbrido experimental según las dimensiones determinadas.
3. Dibujar las curvas de secado del proceso de deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), con el secador construido, al operar únicamente con energía solar, y al operar alternando con energía solar y eléctrica.
4. Determinar el punto crítico del proceso de deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), con el secador construido.

5. Comparar el tiempo de secado para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), con el secador construido, al utilizar energía solar y eléctrica, respecto del tiempo de secado al utilizar únicamente energía solar.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis de trabajo

Es factible diseñar y construir un secador solar híbrido para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez; y evaluar el punto crítico del proceso y el tiempo de secado en función de dos diferentes métodos de secado: secado solar y secado híbrido.

## Hipótesis estadística

### Hipótesis nula

$H_{01}$ : No existe diferencia significativa en el tiempo de secado para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), si se utiliza únicamente energía solar o se combina energía solar y eléctrica.

### Hipótesis alternativa

$H_{i1}$ : Existe diferencia significativa en el tiempo de secado para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), si se utiliza únicamente energía solar o se combina energía solar y eléctrica.



## INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo se han conducido varias investigaciones sobre la utilización de energía solar para la deshidratación de alimentos con el fin de preservarlos y aumentar su vida de anaquel, particularmente en países de la zona meridional del planeta, como Nigeria e India, donde la cantidad de radiación solar es relativamente estable a lo largo del año. Estos estudios, como los que en 2017 realizaron Chaudhari y Hussein, también analizan la factibilidad de combinar la radiación solar con otras fuentes de energía, como la eléctrica, diseñando secadores solares híbridos y reportando reducciones en el tiempo de secado como resultado de esta innovación. La mayoría de estos estudios de investigación, sin embargo, no evalúan a través de un análisis estadístico si esta reducción de tiempo de secado es significativa.

El Instituto Nacional de Estadística INE y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA, han dado a conocer en sus informes que el durazno (*Prunus persica*), es uno de los principales cultivos de Guatemala, y el segundo más producido en el departamento de Sacatepéquez después del aguacate (*Persea americana* Mill.), representando el 5,4 % de la producción nacional de esta fruta, por lo que la implementación de la tecnología de deshidratación solar en esta región tiene potencial de impactar positiva y directamente sobre la producción y economía local.

La región occidental del país presenta características climáticas propias, como alta presencia de nubes y temperaturas menores a 20 °C, el clima promedio en San Bartolome Milpas Altas Guatemala, las cuales pueden llegar a dificultar la operación de un secador solar. Por lo tanto, se hace necesario

investigar la operación de secadores solares combinados con una fuente alternativa de energía para calentar el aire de secado, es decir, el uso de un secador híbrido, para mejorar el desempeño del equipo.

## 1. ANTECEDENTES

En la Universidad de Tecnología y Agricultura Maharana Pratap de Udaipur en Rajasthan, India, se construyó un secador solar híbrido de una sola cámara de secado en la que también se encuentra el colector solar, además de un sistema de calentador eléctrico, que también se pretende utilizar como estufa al cerrar las entradas y salidas de aire. Se le realizó una prueba de agua hervida (*water boiled test*), y se determinó un valor de 28,93 % de eficiencia térmica, y que su potencia promedio fue de 84,18 W. Como secador es capaz de secar chile verde (*Capsicum frutescens* L.) desde 80,58 % de humedad, hasta 6,89 % en 23 horas utilizando solamente energía solar, y en 18 horas con el uso de ambas fuentes de energía explican Chaudhari y Bhavsar.

En la Universidad Tecnológica Modibbo Adama en Yola, Nigeria, se diseñó y construyó un secador solar híbrido con celdas fotovoltaicas que convertían parte de la energía solar en energía eléctrica. Se operó sin carga para determinar sus temperaturas de operación, y luego se operó con carga para determinar las curvas de secado. Comentan Hussein y otros autores, que la temperatura máxima se alcanza a la 1:30 P.M. y se mantiene durante hora y media alcanzando un incremento de temperatura de 9,9 °C respecto de la temperatura ambiente usando solo energía solar y de 17,2 °C usando ambas fuentes de energía.

En la Universidad SRM (Kattankulathur) en Chennai, India, se analizó el fenómeno de transferencia de masa en diferentes tipos de secado a escala laboratorio. Para esto se recurrió a cálculos de parámetros como la difusividad de la humedad, de forma experimental. Gwala y Padmavati reportaron que el

secado solar provee un aumento de temperatura promedio de 6 °C respecto de la temperatura ambiente. También se encontró que el secado eléctrico en bandeja necesitó 14 horas para secar rodajas de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) a 8 % de humedad, mientras que el secado solar y el secado al aire libre necesitaron 20 horas para realizar la misma tarea en las mismas condiciones.

En la Universidad Kasdi Merbah de Ouargla en Ouargla, Argelia, se diseñó y construyó un secador solar indirecto de escala industrial, al que se le evaluó su desempeño por medio de mediciones de temperaturas, radiación solar y velocidad del aire dentro del secador y el cálculo de la eficiencia térmica del colector solar. El estudio determinó que la eficiencia térmica promedio del colector solar fue de 32,32 % con convección natural y de 51,33 % con convección forzada. También se encontró que la radiación solar fue máxima desde la 1:00 P.M. hasta las 3:00 P.M. y que ésta varió entre 765 y 850 W/m<sup>2</sup> y se alcanzó un incremento de la temperatura del aire de secado de 19,5 °C respecto de la temperatura ambiente según explican Khama, Aissani y Alkama en el informe de la investigación.

En la Universidad Tecnológica Modibbo Adama en Yola, Nigeria, se analizó con métodos estadísticos de análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Duncan las diferencias en propiedades sensoriales y funcionales de rodajas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) secadas por medio de diferentes tipos de secado. Se encontró que la densidad aparente del producto deshidratado con secador híbrido es 0,025 g/ml menor que el deshidratado con secador solar, y 0,07 g/ml menor que el secado al aire libre, y que esto era una diferencia significativa a  $p < 0,05$ , como explican Hussein, Usman y Filli, respecto a los tipos de secado.

En el Instituto Nacional de Tecnología de Calicut en Calicut, Kerala, India, se realizó un análisis de costo-beneficio de un secador solar híbrido, considerando como beneficio los ahorros económicos a que se llegó con el uso de un secador híbrido en lugar de un secador únicamente eléctrico. Sajith y Muraleedharan evaluaron el desempeño del secador con una fruta propia de la región conocida como amla (*Phyllanthus emblica* L.), y se encontró que se necesitaron 11 horas para deshidratar 1 kg de la fruta, determinando a partir de esto que se puede secar un total de 187,5 kg de amla (*Phyllanthus emblica*), al año, y que el secador híbrido tiene un periodo de recuperación de la inversión de 5,66 años.

En la Universidad de Santiago de Chile, en Santiago de Chile, se realizaron pruebas de rehidratación a rodajas de tomate (*Solanum lycopersicum*), deshidratadas en un secador híbrido, las cuales se sumergieron en agua a 35 °C y se encontró que la humedad en equilibrio de rehidratación es de 75 %. Durante la operación del secador se reportaron incrementos de temperatura del aire de secado de hasta 18 °C con convección forzada, y se reportaron valores de hasta 600 W/m<sup>2</sup> de radiación solar. También se encontró según Mahn, Huenulaf y González, que la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del secador fue en promedio 12 °C.

Al-Kayiem y Yunus de la Universidad Tecnológica PETRONAS, en Perak, Malasia, construyeron un secador solar híbrido equipado con un quemador de biomasa, que se pretende utilizar para el secado de EFB (manojos vacíos del fruto de la palma (*Elaeis guineensis* Jacq), para a su vez producir combustible sólido de biomasa. El estudio determinó diferente número de horas para el secado de 2,5 kg de EFB por medio de diferentes métodos: 100 horas por secado al aire libre, 66 horas promedio por secado solar, 52 horas promedio por

secado con el quemador de biomasa, y 28 horas promedio operando de forma híbrida, es decir, con el colector solar y el quemador de biomasa.

En la Universidad Kasdi Merbah de Ouargla en Ouargla, Argelia, se realizaron experimentaciones con un secador solar con y sin fuentes de energía alterna, y luego se optó por profundizar más con el aprovechamiento de la energía solar con un secador híbrido equipado con una red de paneles fotovoltaicos. Se demostró que el uso de una fuente alterna de energía es necesario para que los secadores solares alcancen un incremento de 20 °C en la temperatura del aire de secado respecto de la temperatura ambiente, según explican Chouicha, Boubekri, Mennouche y Berrbeuh. También se observó que la diferencia de temperatura entre el producto a secar, rodajas de papa (*Solanum tuberosum* L.), y el aire, era en promedio de 8,5 °C al inicio y de 5,5 °C al final del proceso de secado.

En el Instituto Leibniz para la Tecnología Agraria y Bioeconomía en Potsdam, Alemania, se construyó un secador solar híbrido para el secado de tomate (*Solanum lycopersicum*). Al secador se le calcularon diferentes tipos de eficiencias: eficiencia del colector durante el día, considerando radiación global y radiación total; durante la noche, y la eficiencia del secador durante el día y la noche. Durante el día se alcanzó un incremento de la temperatura del aire de secado de hasta 30 °C respecto de la temperatura ambiente. Las eficiencias máximas que se alcanzaron explican Hossain, Amer y Gottschalk que fueron: en el colector 45,80 %, y en el secador 29,35 %, y fue durante el día, utilizando un reflector para captar en mejor ángulo la radiación solar.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Secado

El secado es una operación unitaria, que consiste en reducir el contenido de humedad (de agua u otro líquido), de un sólido hasta un mínimo aceptable. Por lo general, el secado es la operación final de un proceso, y de inmediato se prosigue al empaquetado. Esta operación se puede realizar mecánicamente con centrífugas o prensas, o térmicamente por medio de una evaporación del líquido. En la presente investigación se estará considerando únicamente la evaporación térmica cuando se refiera a secado. Cabe mencionar que el producto final de la operación aún contiene líquido en su interior, es decir, el secado no se refiere necesariamente a la evaporación total del contenido líquido de un sólido, sino más bien a una reducción de este.

El proceso de secado presenta una gran variedad de parámetros a considerar. Cada sistema presenta sus propias características como: sensibilidad a la temperatura, flujo del líquido en el sólido, forma de transferir calor, geometría del sólido, entre otras; que determinan y condicionan el diseño de los equipos de secado, y dan lugar a que exista una gran variedad, como lo detallan McCabe, Smith y Harriot. Esta variedad dificulta la clasificación de los equipos, pero según diferentes parámetros de importancia se pueden clasificar en: continuos, por lotes, al vacío, en movimiento, estáticos, y específicos para algún producto de importancia.

### **2.1.1. Deshidratación de alimentos**

Las frutas y verduras frescas tienen un alto contenido de nutrientes esenciales, pero debido al alto contenido de humedad, estos productos frescos tienen una vida de anaquel corta. Uno de los métodos de preservación más aplicado para extender la vida de anaquel es el secado, que en el caso de alimentos se prefiere el término deshidratación y alimentos deshidratados. Cuando hay un bajo contenido de humedad, la actividad de agua también es baja y, por lo tanto, la actividad microbiana también lo es, según afirma Jin en su investigación sobre los mecanismos de secado, lo cual permite la preservación de alimentos durante un largo periodo. Generalmente, la deshidratación de alimentos se realiza con circulación de aire sobre un lecho estático de sólidos.

Esta tecnología se utiliza desde tiempos antiguos, cuando la gente usaba el sol y el viento para una deshidratación natural de alimentos. La experiencia a través de los años y la investigación moderna han dado como resultado varios métodos y equipos para la deshidratación de alimentos. Entre los métodos disponibles actualmente, el secado convectivo con aire caliente es uno de los más aplicados para preservar frutas y productos vegetales. La cantidad de calor suministrada depende de las especificaciones de la materia vegetal, pues puede haber riesgo de degradación de compuestos por temperatura.

En años recientes, la demanda de parte de los consumidores de países industrializados de productos alimenticios procesados y de conveniencia ha aumentado, y así también las expectativas de calidad, valor nutricional y sostenibilidad. Todo esto, según Jin, conduce a la necesidad de investigación y particularmente innovación de tecnologías de secado.

### **2.1.2. Procesos adicionales al secado para materias orgánicas**

Durante el proceso de deshidratación de materia vegetal, además de la activación y retención de compuestos bioquímicos, se debe tomar en cuenta otros atributos de calidad de los productos secos, particularmente aquellos que el consumidor percibe y emplea para formar su opinión, como lo son el color, la porosidad, la textura, el sabor, entre otros. Por lo tanto, se hace necesario añadir otras operaciones al proceso de deshidratación de materiales vegetales, que se ocupen de estos parámetros.

Estas operaciones incluyen pretratamientos como lavado, pelado, blanqueado, entre otros, el secado propiamente, y post tratamientos como empacado y almacenado. Jin afirma que estos tratamientos pueden afectar las propiedades del producto final positivamente, mejorando la digestión o preservando la coloración; o pueden afectarlas negativamente, degradando enzimas o micronutrientes, por lo que se hace necesaria la planificación de estos según investigaciones previas.

Antes de la deshidratación de materia vegetal, se puede necesitar un pretratamiento térmico. Las enzimas presentes en las materias vegetales pueden causar reacciones que produzcan cambios de color y olores desagradables. Por lo tanto, antes de la deshidratación, la mayoría de frutas y vegetales son sumergidos en agua caliente, o reciben algún otro tratamiento térmico, con el fin de desactivar enzimas y mejorar el color y sabor del producto final; este proceso recibe el nombre de blanqueado. Según investigaciones de Jin, el blanqueado rompe las paredes celulares internas, suaviza el tejido interno, y modifica el material haciéndolo más elástico, lo cual a su vez mejora la velocidad de secado y hace que el proceso sea más uniforme.

### **2.1.3. Pretratamientos de bajo costo para deshidratación de frutas y vegetales**

Dado que la calidad del producto final de la deshidratación de frutas y vegetales está muy relacionada con el pretratamiento que se aplique, se han investigado y desarrollado varios pretratamientos. Sin embargo, los pretratamientos de bajo costo, para utilización en pequeños y medianos emprendimientos, se pueden delimitar, según los recomendados por la Fundación Celestina Pérez de Almada, institución que ha investigado la aplicación del secado solar en áreas rurales de Latinoamérica:

Blanqueado: Consiste en sumergir el material vegetal en agua a aproximadamente 95 °C con el fin de inactivar enzimas, ablandar el producto, eliminar parcialmente el contenido de agua, preservar el color y sabor y reducir parcialmente la población de microorganismos. El tiempo de blanqueado depende del material vegetal, y es mejor determinarlo experimentalmente en función de los resultados deseados. Las reacciones enzimáticas producen pigmentos oscuros llamados melaninas, y la producción de estos es inhibida al desactivar las enzimas. El blanqueado también favorece la retención de vitamina C y otras vitaminas. Durante el procedimiento, se debe procurar que el centro del sólido ascienda hasta la temperatura deseada, no solamente los bordes, y después de alcanzar la temperatura deseada, es necesario sumergir el sólido en agua fría para evitar que continúe la cocción. Para que el blanqueado sea homogéneo, se recomienda envolver el sólido en un paño permeable al agua a lo largo de todo el proceso.

- Sulfitado: Los sulfitos reaccionan con los azúcares del material orgánico, inhibiendo otras reacciones que resultan en oscurecimiento del material. El sulfitado consiste en sumergir el sólido en una solución acuosa de alguna

sal de metabisulfito de 5 g a 10 g por litro de agua, durante 5 a 10 minutos. No es necesario el calentamiento de la solución, y se recomienda utilizar recipientes no sensibles a la corrosión. El azufre en concentraciones elevadas es tóxico, por lo que se recomienda que la dosis no exceda de 0,05 % del producto deshidratado.

- Tratamiento con ácidos orgánicos: El ácido cítrico o el ácido ascórbico (vitamina C), ambos presentes en el jugo de frutas cítricas, particularmente el limón, inhibe reacciones de oscurecimiento de la materia orgánica, de una manera similar al sulfito, sin embargo, al ser un ácido, modifica el sabor del producto final. Para su aplicación, se recomienda sumergir el sólido en jugo de limón diluido en agua 1:10.
- Bicarbonato de sodio: El bicarbonato conserva y estabiliza la clorofila de las plantas, haciéndolas más resistentes a la incidencia directa de los rayos solares, como sucede en los secadores tipo carpa, conservando así la coloración verde que pueda tener la materia orgánica; por esta razón, solamente se recomienda para hierbas, hortalizas y legumbres de color verde. Este pretratamiento también ablanda las capas exteriores del material, facilitando la salida de agua dentro del sólido y mejorando la textura del producto final. Su aplicación consiste en sumergir el sólido en una solución de bicarbonato de sodio de 30 g más 3 g de sal común en un litro de agua, alcanzando un pH de aproximadamente 9.
- Agrietado: Para las frutas que se secan con la cáscara, como higos, uvas y pasas, se recomienda un proceso de agrietado de la cáscara para facilitar el secado. Consiste en sumergir el sólido en una solución de hidróxido de sodio 10 g por litro de agua, a 80 °C, durante 5 a 10 segundos. Posterior al agrietado se requiere lavar con agua potable y

neutralizar con ácido cítrico 2 g por litro durante 30 segundos, para neutralizar el álcali.

- Salado y almibarado: El salado consiste en adicionar cloruro de sodio (sal común) al sólido a secar, y el almibarado a adicionar sacarosa (azúcar común). Dependiendo del producto a deshidratar se elige entre uno u otro para acentuar su sabor, pero tanto el salado como el almibarado tienen como objetivo reducir la actividad de agua en el sólido y reducir así, e incluso inhibir, el desarrollo de microorganismos, facilitando el proceso de secado y la inocuidad del producto final.

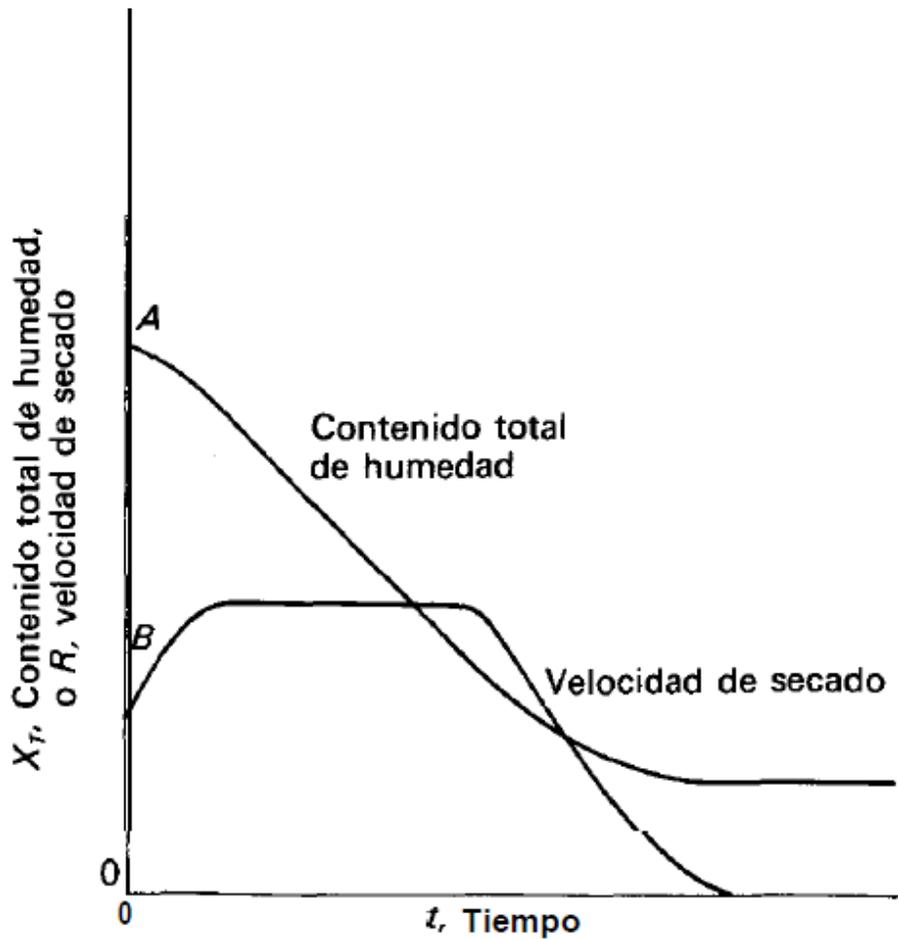
#### **2.1.4. Curvas de secado**

En un proceso de secado, conforme pasa el tiempo, el contenido de humedad disminuye, como se muestra en la curva *A* de la figura 1. Cuando el sólido ha alcanzado una temperatura de equilibrio con el gas de secado, la vaporización se realiza en equilibrio, y por lo tanto la curva se vuelve lineal; finalmente se llega a un contenido de humedad constante, y la curva se vuelve horizontal, según lo ejemplifica McCabe. En la misma figura, la curva *B* representa el comportamiento típico de la velocidad de secado: después de un pequeño periodo de crecimiento, se puede observar otro largo periodo en que permanece constante, para finalmente decaer hasta cero, que es cuando se llega al contenido de humedad de equilibrio.

Geankoplis por su parte representa el comportamiento de la velocidad de secado, pero en función del contenido de humedad como se observa en la figura 2, en el cual el punto de mayor contenido de humedad representa el inicio del proceso, y su pendiente depende de si el sólido entra frío o caliente;

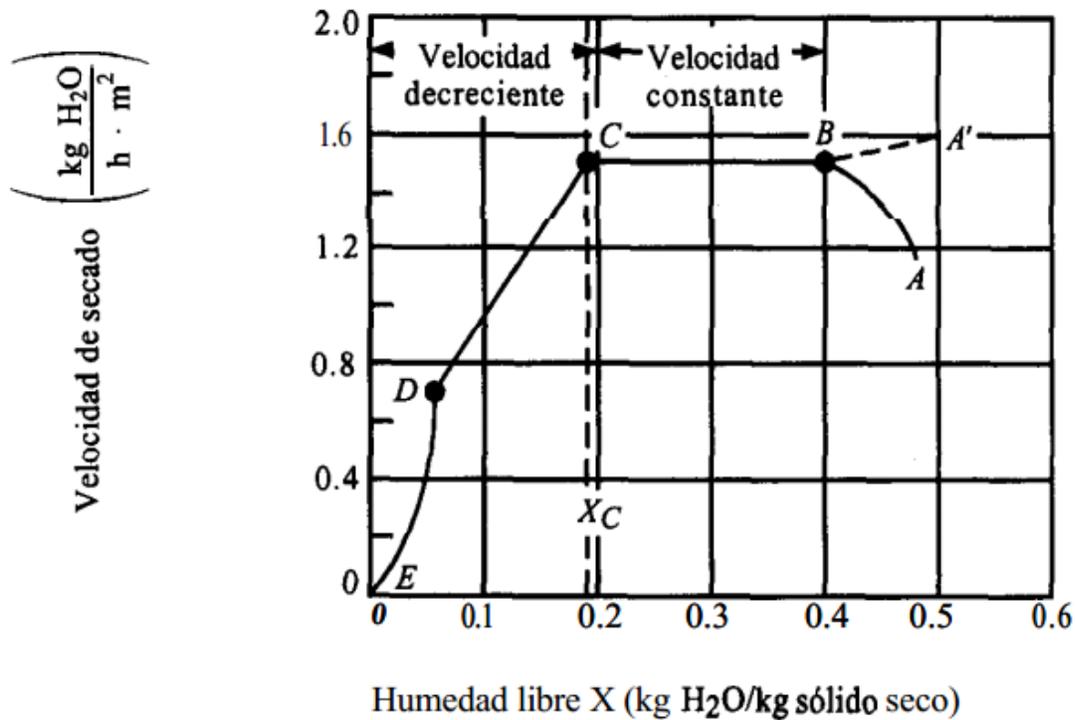
también se representa la etapa de velocidad constante y la etapa de velocidad decreciente análogas a las que se representan en la curva *B* de la figura 1.

Figura 1. Gráficas típicas del contenido total de humedad y de la velocidad de secado frente al tiempo de secado



Fuente: MCCABE, Warren. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 832.

Figura 2. Gráfica típica de velocidad de secado en función del contenido de humedad



Fuente: GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 598.

Estas tres curvas, de contenido de humedad y velocidad, en función del tiempo de secado, y velocidad en función de contenido de humedad, se conocen comúnmente como curvas de secado, y este comportamiento típico que presentan se debe a las diferentes condiciones del sólido durante el proceso. Particularmente, en el caso de sólidos porosos, como las frutas y verduras, estas condiciones que se presentan son las siguientes:

El inicio del proceso es un pequeño periodo de estabilización, en el que la temperatura del sólido y del gas de secado, y otras variables llegan a un

equilibrio. Cuando el proceso se estabiliza, se forma una película de líquido sobre la superficie del sólido que entra en contacto con el gas de secado. Este proceso es básicamente transferencia de calor y masa entre esta película y el gas, como si el sólido no existiese; esta película es renovada constantemente por el líquido dentro del sólido, que se encuentra en los poros e intersticios, y llega a la superficie impulsado por la tensión superficial con el gas, un fenómeno conocido como capilaridad. Bajo estas condiciones, la velocidad de secado es constante.

McCabe explica que conforme el líquido fluye capilarmente a la superficie y se evapora, los poros del sólido se van vaciando de líquido y llenando de gas de secado. Entonces los poros son inhabilitados como conductores de líquido a la superficie, haciendo que la velocidad del flujo total de líquido del interior del sólido a la superficie decaiga. Este flujo decae hasta un valor menor a la velocidad de vaporización en la superficie del sólido y entonces se dificulta renovar la película de líquido superficial. Luego, en la superficie del sólido, se empiezan a formar áreas secas y disminuye el área de contacto de líquido con el gas circulante. Todo esto causa que decaiga la velocidad de secado en un punto conocido como punto crítico, que se expresa a determinado contenido de humedad.

Después del punto crítico, el líquido llega a la superficie del sólido principalmente por mecanismo de difusión, para ser inmediatamente evaporado en la superficie. Entonces, en esta etapa la velocidad de secado ya no depende de las variables de operación del gas de secado, sino del contenido de humedad dentro del sólido, que es el que rige la difusión. La velocidad de secado decae hasta llegar a cero, cuando el sólido llega a su contenido de humedad de equilibrio, en el que la difusión y demás mecanismos ya no pueden extraer más líquido del sólido.

Uno de los parámetros más importantes en el diseño de secadores es el tiempo de secado, el cual es constante para un mismo sistema a condiciones de operación constantes. El tiempo de secado a condiciones fijas permite correlacionar el tamaño del secador únicamente a la capacidad requerida. Este tiempo de secado se puede determinar a partir de las curvas de secado, de allí su importancia. Estas curvas se obtienen a partir de experimentaciones, las cuales proveen directamente el tiempo de secado. Al cambiar las condiciones de secado, el tiempo de secado es diferente, pero se puede estimar a partir de las curvas de secado ya realizadas.

Las formas de las curvas de secado son típicas, pero sus valores puntuales son dependientes de las variables de operación del proceso de secado y del grosor, forma y porosidad del sólido, por lo tanto, son característicos de cada proceso y no son un valor intrínseco del material, McCabe indica que es mejor determinarlos experimentalmente.

#### **2.1.5. Circulación del gas de secado**

La circulación de gas de secado a través del sólido húmedo, es decir, penetrando el lecho del sólido, es preferible a la circulación alrededor de este, pues este tipo de circulación resulta en una velocidad de secado más alta. McCabe explica que, si el sólido es suficientemente grande, este tipo de circulación es posible, y si el sólido es pequeño, granulado, se puede arreglar u ordenar, de tal manera que se formen grupos de sólidos más grandes, separados unos de otros, permitiendo así la penetración del gas de secado. Generalmente, los sólidos pequeños así arreglados, retienen su geometría durante el proceso, resultando en un sólido grande altamente poroso.

Un valor promedio de la humedad de equilibrio para la mayoría de sólidos es de 10 % en base húmeda. McCabe registra ejemplos de comparación entre secado a través del sólido y alrededor de este, y ha encontrado que el primero resulta en una producción 30 a 40 veces mayor que el segundo, en la misma cantidad de tiempo, bajo las mismas condiciones de secado. También ha encontrado que el grosor del sólido, o del arreglo realizado, influye en la velocidad de secado, particularmente después del punto crítico, donde el mecanismo de secado es por difusión, mejorando a causa de que hay una menor distancia hacia la superficie.

#### **2.1.6. Psicrometría del proceso de secado**

El proceso de secado también involucra un proceso de humidificación del gas de secado con el líquido a remover del sólido, y se puede analizar como tal, particularmente en la fase de velocidad de secado constante, en la cual el sólido está cubierto por una capa constante de líquido. Este proceso involucra una transferencia de masa y energía simultáneas. La mayoría de estos cálculos que involucran sistemas gas-vapor se realizan utilizando una unidad másica de gas, sin tomar en cuenta el vapor que lleva, como base de cálculo, a esto se le llama base seca; si, por el contrario, la base de cálculo es una unidad másica de mezcla gas-vapor, a esto se le llama base húmeda, aunque lo más común es realizar cálculos en base seca, según lo indica McCabe.

El estudio de los sistemas gas-vapor, en especial el sistema aire-agua, y sus propiedades físicas y termodinámicas pertenece a un campo de la ingeniería conocido como psicrometría. La psicrometría define varios parámetros de utilidad para caracterizar un sistema gas-vapor, sin embargo, por motivos de simplificación, estudia los procesos a presión constante, que es el caso general en procesos de humidificación y deshumidificación simple;

además, también supone un comportamiento ideal de los gases. Estos parámetros son:

- **Humedad:** Es la masa de vapor que lleva una unidad másica de gas. A presión constante, este parámetro es dependiente únicamente de la presión parcial del vapor en la mezcla. También se le conoce como contenido de humedad.
- **Gas saturado:** Es gas que lleva vapor en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas. La presión parcial del vapor en el gas es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas.
- **Humedad de saturación:** Es la humedad en la que el gas se satura.
- **Humedad relativa:** Es la razón de la presión parcial del vapor respecto de la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas. Se expresa en porcentaje, y es una cuantificación del grado de saturación del gas, siendo 100 % gas saturado y 0 % gas sin vapor, es decir, totalmente seco.
- **Volumen húmedo o volumen específico del sistema:** Es el volumen de una unidad másica de gas junto con su humedad, a la temperatura del gas.
- **Punto de rocío:** Es la temperatura a la cual una mezcla de gas-vapor debe enfriarse, a humedad constante, para que se sature. Un gas saturado está en su punto de rocío.
- **Entalpía:** En el contexto de psicrometría, se refiere a la entalpía de una unidad másica de gas más la entalpía del vapor que contiene.

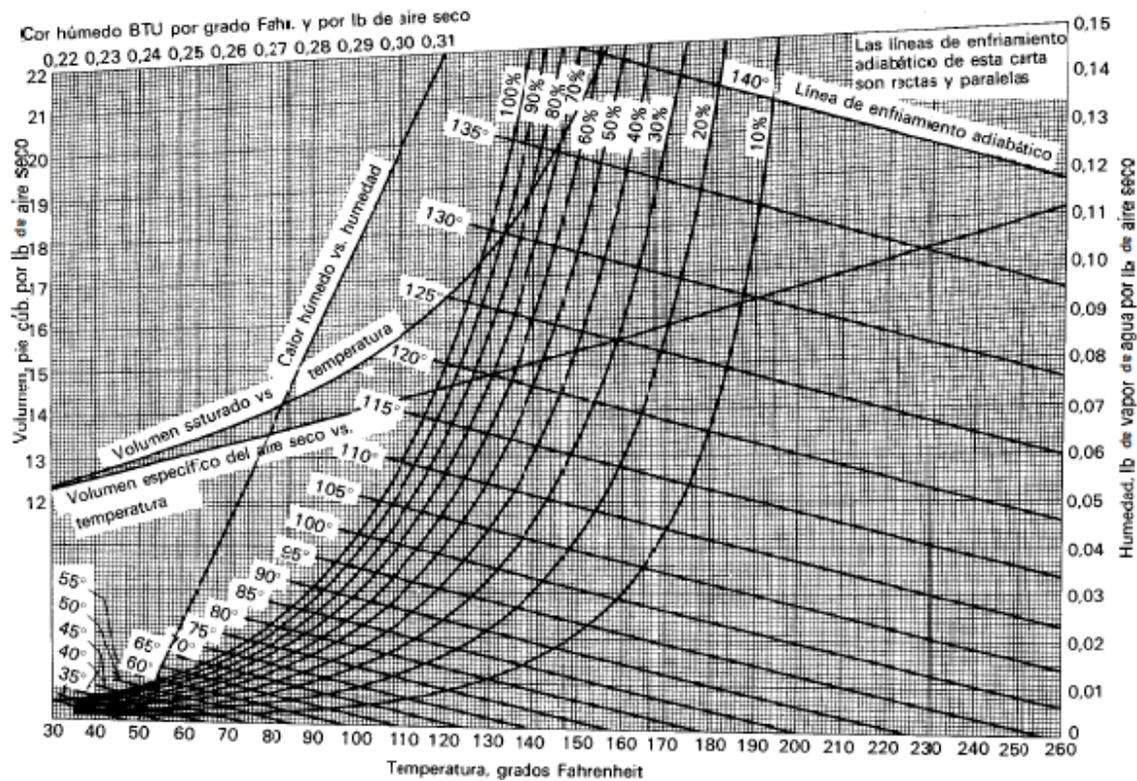
- Temperatura de bulbo húmedo: Es la temperatura en estado continuo, no en equilibrio, a la que llega una pequeña masa de líquido sumergida en un flujo continuo de gas. Para un proceso de secado adiabático, sin pérdidas de calor, el sólido se comporta como una pequeña masa de líquido sumergida en un flujo continuo de gas, por lo tanto, este se encuentra a la temperatura de bulbo húmedo. Dado que este parámetro depende tanto de la transferencia de calor como de la transferencia de masa, es más preciso determinarlo experimentalmente.
- Temperatura de bulbo seco: Es la temperatura del gas, llamada de esta manera para diferenciarla de la temperatura de bulbo húmedo. Cuando el gas es saturado, la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo y el punto de rocío son todos iguales.

Todas estas variables se relacionan a través de ecuaciones basadas en análisis físicos y termodinámicos, en correlaciones y datos experimentales. Basándose en estas relaciones, se ha encontrado que se necesitan dos variables para determinar las demás, a excepción del punto de rocío que depende únicamente de la humedad. Varios autores han representado gráficamente estas relaciones, en lo que se conocen como cartas de humedad o cartas psicrométricas. Una de estas cartas de humedad, conocida como diagrama de Grosvenor, se presenta en la figura 3.

McCabe indica que el diagrama de Grosvenor es la carta psicrométrica más usual en la literatura técnica, y representa la humedad en función de la temperatura. La curva de saturación va desde la parte inferior izquierda hasta la superior derecha y tiene curvas aproximadamente paralelas a esta que representan humedad relativa constante. También tiene curvas casi lineales, que van desde la parte superior izquierda hasta la inferior derecha, que

representan entalpía constante o temperatura de bulbo húmedo constante, según la edición, y que también se pueden utilizar para el otro parámetro, utilizando un valor de corrección, pues las curvas para ambas variables son muy similares. Un punto en la carta psicrométrica representa el estado termodinámico de una mezcla gas-vapor.

Figura 3. **Carta psicrométrica de Grosvenor para temperaturas medias del sistema aire-agua**



Fuente: MCCABE, Warren. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 772.

## **2.2. Secador de alimentos**

Un secador es el equipo donde se realiza el proceso de secado. Este equipo puede presentar gran variedad de especificaciones, todas dependiendo del tipo de las características y necesidades económicas del proceso. Si el secador opera suministrando calor a través de un gas de secado (generalmente aire) directamente sobre el sólido a secar, entonces se le llama secador directo; si, por el contrario, suministra el calor por medio de otro agente, como una plancha metálica, entonces es un secador indirecto. Los secadores directos son los más comunes, variando la fuente energética para calentar el gas de secado, según detalla McCabe.

En el caso de alimentos, es importante la inocuidad del proceso, por esta razón, un secado al aire libre no es lo más recomendable para un producto final. También depende de la escala del proceso, si se necesitan secar varios quintales de azúcar en un ingenio, o un lote de frutas en una pequeña granja agrícola. Depende del tiempo que se estime para la operación. Para pequeños emprendimientos agrícolas, la energía solar puede ser una fuente barata de energía para calentar el gas de secado, que en este caso sería el aire.

La temperatura de gas de secado es una variable muy importante para los secadores directos, pues mientras mayor sea la elevación de la temperatura respecto de la temperatura ambiente, mayor será la transferencia de masa y energía que sucederá entre este y el sólido a secar. Se debe tomar en cuenta las restricciones de temperatura del sólido, que en el caso de los alimentos es muy importante para evitar una degradación del producto, y el costo económico de las fuentes de energía al momento de determinar la temperatura de operación.

Los secadores típicos para sólidos pueden o no incluir bandejas, agitación del sólido, calentamiento a través de un gas de secado o a través de contacto con un sólido. Puede tener un equipo de extracción de gases o un ventilador que solamente distribuya y agite el gas de secado en el interior, en cuyo caso sería un equipo con convección forzada, o podría no tener ninguno de estos equipos y solamente mover el gas por convección natural. Los secadores de bandejas son particularmente útiles para pequeños lotes, en los que es más importante la calidad y el control de las condiciones de secado, que la cantidad producida, como sugiere McCabe.

### **2.2.1. Secador solar**

Un secador diseñado para utilizar la energía solar como fuente de energía para calentar el gas de secado es un secador solar. Este tipo de secadores se utiliza con el fin de operar a bajo costo. Un secador solar dispone de un compartimento, llamado colector solar, donde se busca crear un efecto invernadero con los rayos del sol para así calentar el gas de secado. El colector debe contar con una pieza que absorba los rayos del sol, elevando así su temperatura y la del gas con el que haga contacto, generalmente es una pieza metálica de color negro orientada hacia los rayos del sol, la cual se conoce como cuerpo negro, como lo explica la Fundación Celestina Pérez de Almada. Los secadores solares para uso agrícola-familiar se pueden clasificar, según su capacidad y estructura, en tres tipos:

- Tipo carpa: Es un diseño consistente en una armazón con forma triangular, revestida de un plástico transparente, resistente a los rayos ultravioleta, que se usa para lotes pequeños. Es muy práctico, portátil e incluso desarmable. Debe contar con una abertura inferior como entrada de aire, y una superior como salida, ambas recubiertas con malla, para

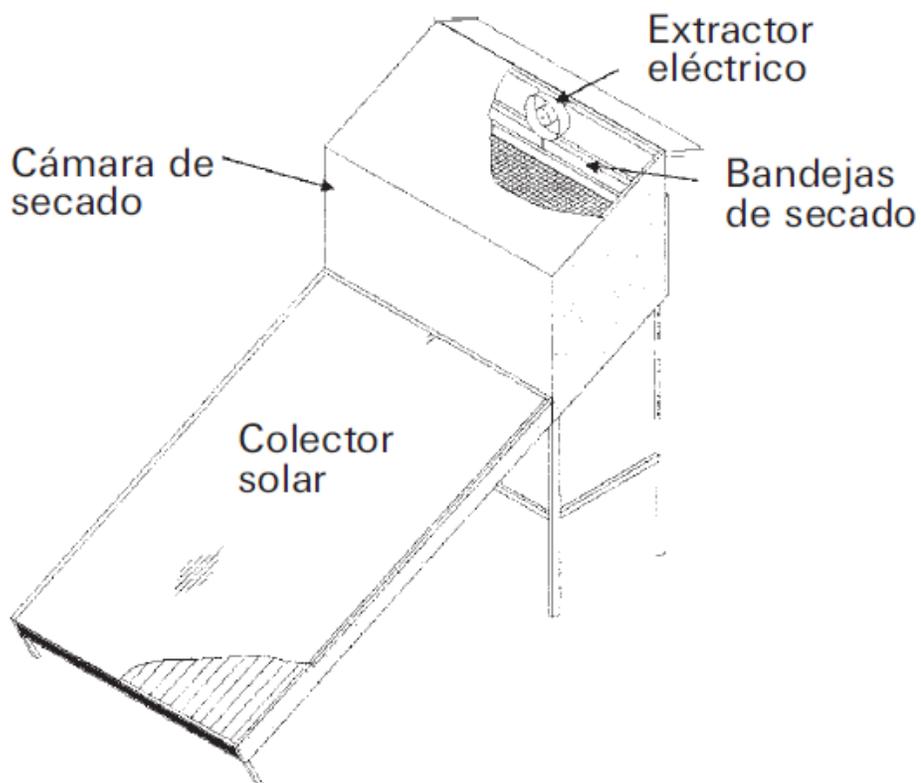
evitar la contaminación o intrusión de insectos. También debe tener una bandeja para secar los productos. La radiación solar incide directamente sobre los productos, es decir, no tiene un colector con una pieza metálica.

- Tipo armario: Es un diseño más grande, con mayor capacidad, y con un colector separado de la cámara de secado. Se utiliza para productos más delicados, sensibles a la radiación solar, y que se les desea conservar el color y otras propiedades naturales. La cámara y el colector se unen por la parte baja de la cámara, la cual está cubierta, es decir, no expone los productos a secar a la radiación solar directa. El colector, por el contrario, tiene una cubierta de vidrio que lo expone a la radiación solar. El aire calentado en el colector asciende a través de las bandejas con el producto a secar, en la cámara de secado, utilizando opcionalmente un extractor de aire para este fin, pero si la convección natural es suficiente, se puede omitir este equipo.
- Tipo túnel: Este es un diseño de mayor capacidad, para pequeños emprendimientos industriales, consistente en un túnel ascendente, elevado con una base rígida, que alterna secciones de colectores y secciones de cámaras de secado. Los colectores calientan el aire, que luego es usado en las cámaras. El aire es circulado por medio de ventiladores.

Los secadores solares son especialmente útiles para pequeños agricultores, debido a lo económico de su construcción y operación, utilizándose para la deshidratación de frutas y vegetales. La materia prima generalmente es sometida a un pretratamiento que puede tener varias funciones, como evitar la degradación del material vegetal o evitar la decoloración por exposición solar. También se somete la materia prima a selecciones y lavados, para garantizar la

calidad del producto final. Es importante también que los materiales que entren en contacto con la materia prima sean inocuos, es decir, no tengan riesgo de contaminar el producto, como lo indica la Fundación Celestina Pérez de Almada, pues generalmente es para uso alimenticio.

Figura 4. **Secador solar tipo armario**



Fuente: Fundación Celestina Pérez de Almada. *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. p. 12.

### 2.2.2. **Secador solar híbrido**

Un secador solar híbrido es aquel que utiliza otra fuente de energía, además de la radiación solar, para proporcionar calor al aire de secado. Estas

fuentes de energía alternas pueden ser de diversos orígenes: gas propano, combustible, electricidad, biomasa, entre otros. De León, en su investigación sobre el diseño de un secador solar para madera, sugiere que esta fuente alterna de energía se utilice generalmente por las noches, para dar continuidad al proceso de secado que se realizó durante el día con la energía solar, o cuando las condiciones climáticas no permitan la operación regular con energía solar; incluso utilizando ambas fuentes de energía simultáneamente para lograr un efecto combinado.

La fuente de energía alterna provee calor a alguna superficie o directamente desprende calor al aire. Si calienta el aire a través de una pieza o superficie, esta se conoce como deshumidificador indica De León.

### **2.3. Durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch.)**

Es el fruto del árbol duraznero o duraznal, cultivado en las regiones de clima cálido. Comúnmente se consumen frescos o como ingredientes en recetas; también se consumen como conservas enlatadas. Las variedades de color amarillo tienen cantidades considerables de vitamina A. Se cree que se domesticó en China hace varios milenios y de allí se difundió en Asia, Oriente Medio y luego a Europa. Después, los españoles introdujeron su cultivo a América aún desde el siglo XVII. Los emprendimientos comerciales a gran escala agrícola empezaron alrededor del siglo XIX en Estados Unidos.

El durazno (*Prunus persica*) presenta variedades genéticas, particularmente entre las variedades llamadas *clingstone*, cuya parte carnosa comestible, llamada mesocarpio, está adherida a la pepita, y las llamadas *freestone*, cuyo mesocarpio se separa fácil y totalmente de la pepita. El color del mesocarpio también está sujeto a variación genética, así como su acidez y

dulzura. Cabe mencionar que estas diferencias son variaciones genéticas dentro de la misma especie, no constituyen una especie diferente, según lo explica Allman.

### **2.3.1. Especificaciones de secado**

La Fundación Celestina Pérez de Almada, que se ha dedicado a la investigación de tecnologías con energías renovables, recomienda que el producto final del secado de durazno (*Prunus persica*), contenga un máximo de 18 % de contenido de humedad en base húmeda. Además, indica que no se registra degradación de la materia vegetal por causa de altas temperaturas, es decir, que no determinan restricciones de temperaturas para la operación de un secador para durazno (*Prunus persica*). El producto se debe envasar inmediatamente después de haber llegado al contenido de humedad objetivo para evitar su rehidratación.

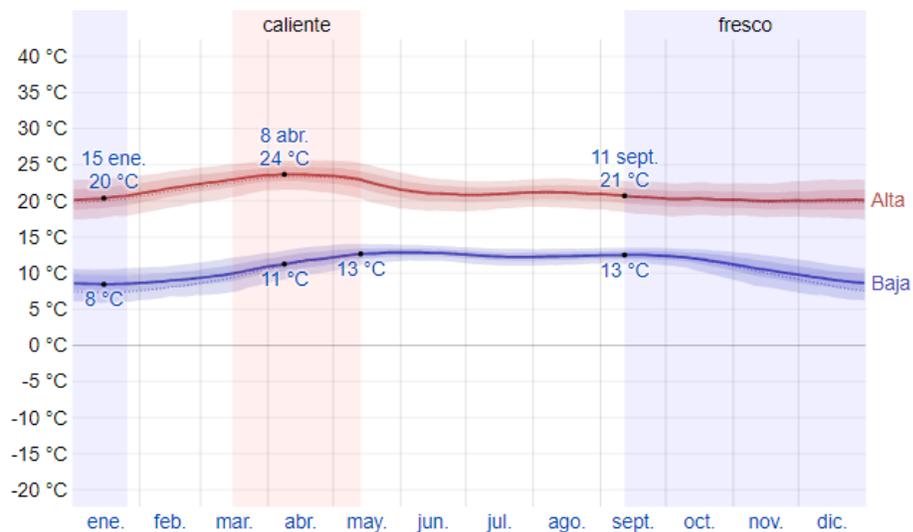
### **2.4. Condiciones climáticas del municipio de San Bartolomé Milpas Altas**

Para un proceso de secado solar es de suma importancia considerar las variables climáticas como temperatura ambiental, humedad, radiación incidente, y la dirección y velocidad del viento, ya que el proceso es muy dependiente de estas, y conocerlas de antemano facilita la planificación de la operación del secador, así como su diseño y orientación. Las variables climáticas particulares al municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez, que se investigaron se muestran a continuación.

### 2.4.1. Temperatura

La temporada cálida dura alrededor de dos meses, de mediados de marzo a mediados de abril, con una media diaria de temperatura alta sobre los 23 °C. La temporada fría dura alrededor de cuatro o cinco meses, de septiembre a enero, con una media diaria de temperatura alta debajo de los 21 °C. Es decir, que no es habitual que la temperatura de la región varíe más de 4 °C o 5 °C de su valor promedio. La figura 5 muestra los promedios diarios de temperatura más alta (curva roja) y temperatura más baja (curva azul).

Figura 5. **Promedio de temperaturas altas y bajas a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**



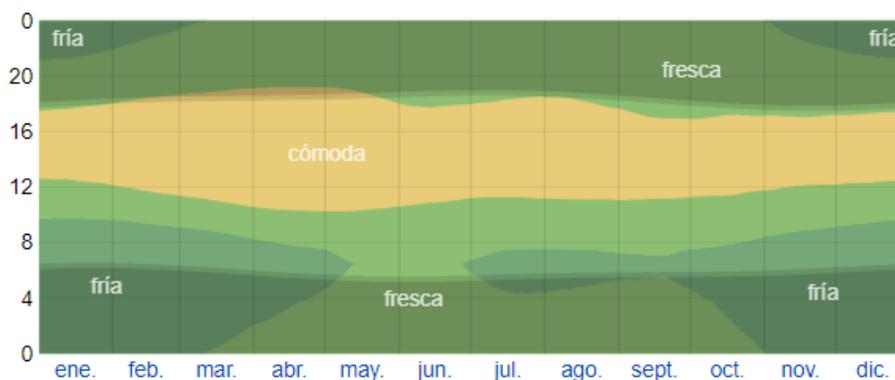
Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*

<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.

La figura 6 muestra curvas de nivel de temperatura promedio en función del día del año y de la hora del día, donde la etiqueta “fría” se refiere a

temperaturas entre 7 °C y 13 °C, la etiqueta “fresca” a temperaturas entre 13 °C y 18 °C, y la etiqueta “cómoda” a temperaturas entre 18 °C y 24 °C. La región sombreada de la gráfica corresponde a horas sin luz del sol.

Figura 6. **Promedio de temperatura en función del día y hora, a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**

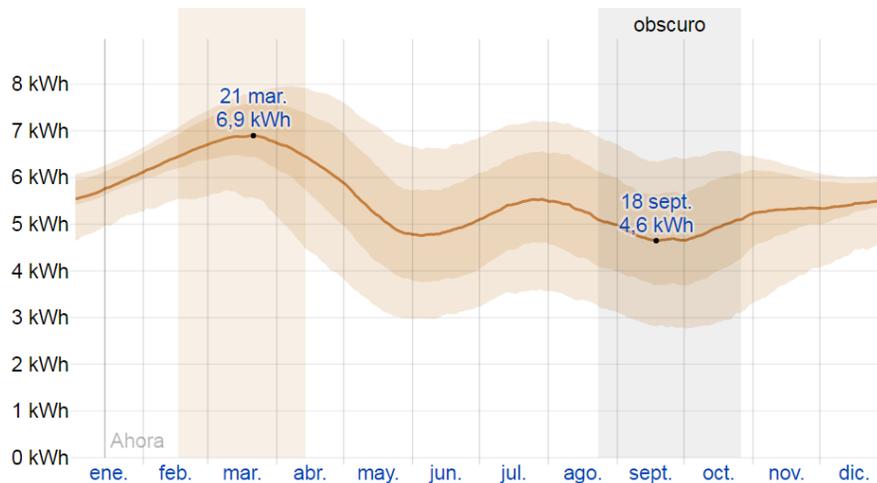


Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*  
<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.

#### 2.4.2. Radiación incidente

La energía solar de onda corta que incide directamente sobre la superficie terrestre está condicionada por la elevación del sol sobre el horizonte, la absorción de las nubes y otros factores atmosféricos, los cuales varían a lo largo del año. La temporada más resplandeciente del año corresponde al mes de marzo con una radiación diaria incidente promedio de 6,4 kWh/m<sup>2</sup>. La temporada más oscura corresponde a septiembre y octubre, con una radiación diaria incidente promedio de 5,1 kWh/m<sup>2</sup>. La figura 7 presenta la energía solar de onda corta incidente en un día en un metro cuadrado de superficie terrestre en función del día del año.

Figura 7. **Promedio de radiación incidente diaria en un metro cuadrado de superficie a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**

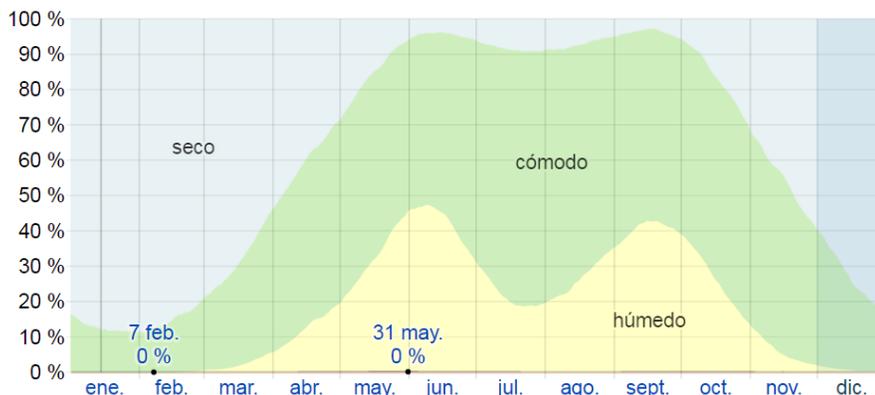


Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*  
<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.

### 2.4.3. Humedad

La humedad del ambiente está relacionada con el punto de rocío y su comparación con la temperatura, mientras más alto sea el primero, mayor es la humedad relativa del aire. Mientras más alto sea el punto de rocío, mayor contenido de humedad habrá en el aire. La figura 8 muestra el porcentaje de tiempo que el ambiente es seco o húmedo a lo largo del año. Esta gráfica emplea una escala propia relacionada con el punto de rocío; donde la etiqueta “seco” se refiere a punto de rocío menor a 13 °C, la etiqueta “cómodo” se refiere a punto de rocío entre 13 °C y 16 °C, y la etiqueta “húmedo” se refiere a punto de rocío entre 16 °C y 18 °C.

Figura 8. **Nivel de humedad a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**



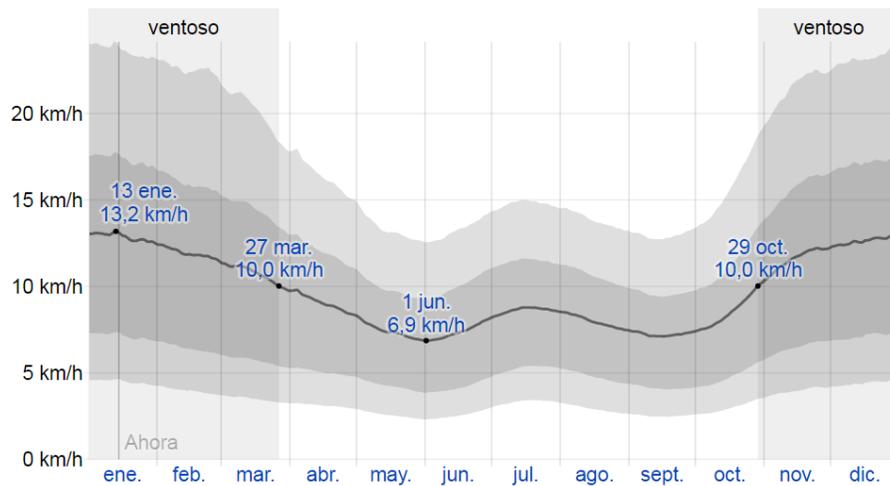
Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*  
<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.

#### 2.4.4. Dirección y velocidad del viento

Las características del vector del viento dependen en gran medida de la topografía local, y su velocidad y dirección instantánea varían ampliamente, sin embargo, sus valores promedio son más estables. La velocidad varía a lo largo del año, siendo los meses con mayor viento de noviembre a marzo, con velocidades promedio de 10,0 km/h. La figura 9 presenta la velocidad promedio diaria del viento a lo largo del año.

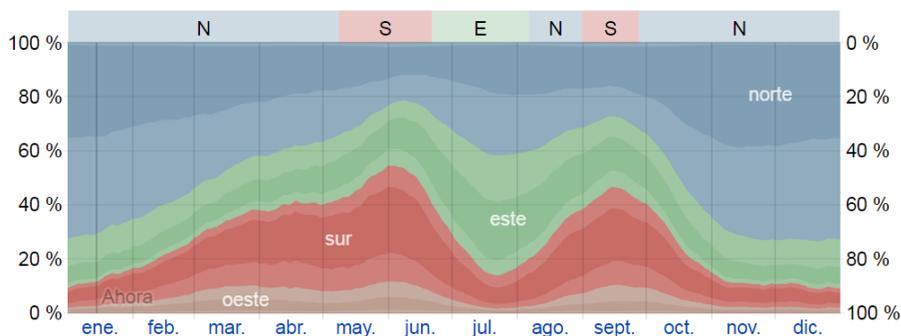
La dirección del viento promedio varía a lo largo del año, pero predominantemente viene del norte, especialmente de octubre a abril. La figura 10 muestra el porcentaje de tiempo del día en que el viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales.

Figura 9. **Velocidad promedio del viento a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**



Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*  
<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.

Figura 10. **Dirección del viento a lo largo del año 2016 en San Bartolomé Milpas Altas**



Fuente: Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.*  
<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Consulta: 17 de septiembre de 2018.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Localización

La parte experimental de la investigación se realizó en las instalaciones de la Cooperativa Integral de Producción “San Bartolomé” R.L., ubicadas en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, departamento de Sacatepéquez.

#### 3.2. Variables

Las variables que se tomaron en cuenta para el diseño, construcción y operación del secador solar híbrido experimental se describen en la tabla I.

Tabla I. Variables de investigación

Variable	Unidad	Dependiente	Independiente
Área del colector solar	m <sup>2</sup>	X	
Área de transferencia de masa	m <sup>2</sup>	X	
Carga de materia prima de un lote	kg		X
Punto crítico de secado	kg <sub>agua</sub> /kg <sub>seco</sub>	X	
Temperatura del aire de entrada	°C		X
Temperatura del aire de secado	°C		X
Tiempo de secado	min	X	

Fuente: elaboración propia.

### **3.3. Delimitación de campo de estudio**

El estudio comprende el diseño, construcción y pruebas de operación de un secador solar híbrido experimental indirecto. El secador está basado en el modelo tipo armario, modificado para incluir una resistencia eléctrica, la cual se utilizará para secar rodajas de durazno (*Prunus persica*). Se realizaron dos tipos de pruebas de secado: operando el secador construido utilizando únicamente el colector solar para calentar el aire de secado y con convección natural (secado solar); y operando el secador utilizando la resistencia eléctrica para calentar el aire de secado, cuando las condiciones climáticas no permitan que el colector solar caliente hasta la temperatura deseada (secado híbrido). Cuando la resistencia eléctrica estaba encendida, también funcionó un ventilador para el movimiento del aire, cambiando el régimen del secador a convección forzada.

Se elaboraron las curvas de contenido de humedad y velocidad de secado en función del tiempo, y velocidad de secado en función del contenido de humedad. Con esto se determinó el punto crítico del proceso y se compararon los tiempos de secado de los dos tipos de pruebas realizadas con el secador. La materia prima se obtuvo en estado maduro, proveniente de cinco agricultores locales de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez.

### **3.4. Recursos humanos disponibles**

Investigador:	Noé Estuardo Calel Jiatz
Asesora:	Inga. Qca. Hilda Piedad Palma Ramos

### 3.5. Recursos materiales disponibles

- Equipo
  - Balanza analítica
  - Barreno
  - Equipo de soldadura
  - Termómetro
  - Calefactor portátil
  
- Materiales de construcción
  - Hierro, perfil angular de 1 ”
  - Lámina metálica
  - Pintura negra anticorrosiva
  - Malla de acero inoxidable
  - Planchas de vidrio de 3 mm
  - Pistola de silicón
  - Tornillos
  - Plancha de Plywood
  - Clavos
  - Electrodo 3/32 1 lb, 6013
  - Electrodo 3/32 1 lb, 6011
  
- Materia prima
  - Frutos del durazno (*Prunus persica*) cortados en rodajas de 4 mm promedio de grosor.

### **3.6. Técnicas cuantitativas de la investigación**

Para el diseño del secador solar híbrido experimental, se realizaron balances de masa y energía, así como un análisis de transferencia de masa, con el fin de calcular las dimensiones adecuadas para el equipo. También se apoyaron los cálculos con criterios de diseño, es decir, dimensiones y variables de operación recomendadas, según las investigaciones previas que se utilizaron como antecedentes. Los materiales y proporciones del secador se estimaron según otros planos consultados. También se planificaron las pruebas de secado, con el fin de obtener los datos necesarios para dibujar las curvas de secado y encontrar las variables requeridas para cumplir los objetivos. Estas técnicas se describen a continuación.

#### **3.6.1. Balance de masa y energía**

La ecuación general de balance establece que:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

Aplicando un balance de masa al proceso de secado, se considera el secador como volumen de control, y la carga y descarga del sólido como el inicio y final del proceso. Dadas estas condiciones, no existe acumulación de materia, puesto que, al descargar, el volumen de control está en un estado igual al inicio. Tampoco existe generación ni consumo general debido a la ley de conservación de la materia, ni generación ni consumo de una especie individual debido a que no existe reacción química. Esto reduce el balance a la siguiente ecuación, tanto para balance general, como para una especie química:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

Las entradas del sistema son la alimentación del sólido húmedo y el aire total de secado que entra durante el proceso, cada uno con un contenido de humedad propio.

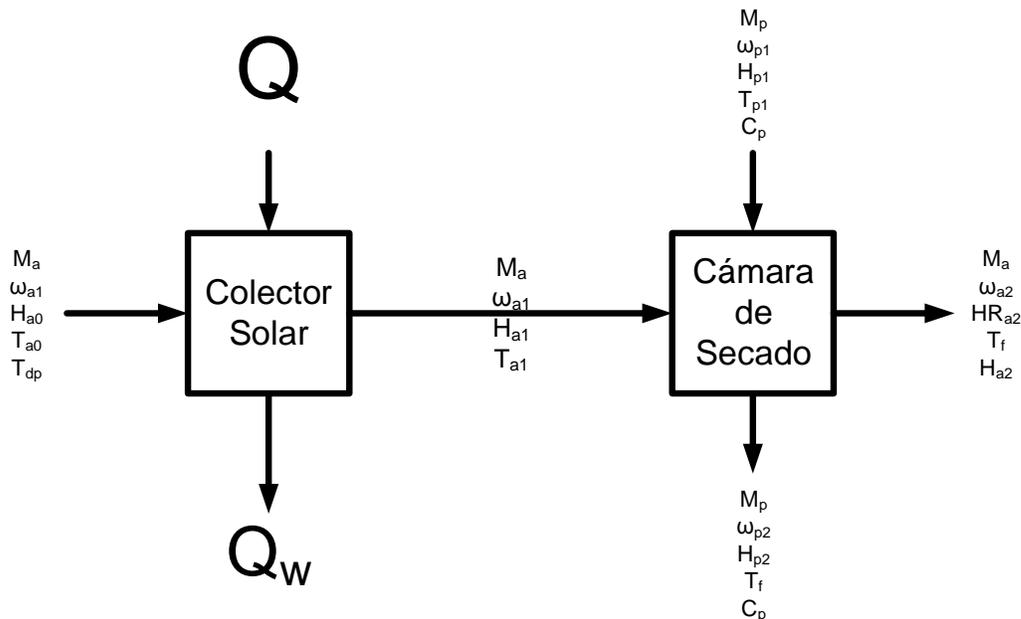
El balance de energía se deduce de una manera similar, a partir de la ecuación general de balance, hasta llegar a la siguiente ecuación:

$$\Delta E = Q + W - \Delta[H + K + P]$$

Para el presente caso, se considera despreciable la acumulación de energía en el sistema, comparado con los cambios de energía de los flujos que intervienen, eliminando  $\Delta E$ . Así también los cambios de energía cinética (K) y potencial (P), y el trabajo que se ejerce sobre el sistema (W) se consideran despreciables, reduciendo la ecuación a un balance de entalpías (H) asociadas a las corrientes de entrada y salida, y a la energía de entrada (Q) que se pretende suplir con energía solar y eléctrica. Para el balance de energía conviene, además, considerar el sistema del colector solar, por aparte.

El balance de masa y el balance de energía se representan conjuntamente en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de balance de masa y energía del secador



Fuente: elaboración propia, con base en la técnica de balance de masa y energía, empleando Visio 2016.

Donde:

$C_p$  = Calor específico del sólido seco.

$\omega_{a1}$  = Contenido de humedad del aire de entrada (base seca).

$\omega_{a2}$  = Contenido de humedad del aire de salida (base seca).

$\omega_{p1}$  = Contenido de humedad del sólido al inicio del proceso (base seca).

$\omega_{p2}$  = Contenido de humedad del sólido al final del proceso (base seca).

$Q$  = Energía de entrada al sistema (que se pretende proveer con energía solar y/o eléctrica).

$Q_w$  = Energía no aprovechada en el colector solar.

$H_{p1}$  = Entalpía del sólido y su contenido de humedad al inicio del proceso.

$H_{p2}$  = Entalpía del sólido y su contenido de humedad al final del proceso.

$H_{a0}$  = Entalpía específica del aire y su contenido de humedad a la entrada del colector solar (base seca).

$H_{a1}$  = Entalpía específica del aire y su contenido de humedad a la salida del colector solar y entrada de la cámara de secado (base seca).

$H_{a2}$  = Entalpía específica del aire de salida (base seca).

$HR_{a2}$  = Humedad relativa del aire de salida.

$M_a$  = Masa de aire (sin contenido de humedad).

$M_p$  = Masa del sólido (sin contenido de humedad).

$T_{dp}$  = Punto de rocío del aire a la entrada del colector solar.

$T_{a0}$  = Temperatura del aire a la entrada del colector solar.

$T_{a1}$  = Temperatura del aire a la salida del colector solar y entrada de la cámara de secado.

$T_{p1}$  = Temperatura del sólido al inicio del proceso.

$T_f$  = Temperatura final del proceso.

Dado que las corrientes se consideran en base seca, los balances de masa del sólido y del aire están implícitos, y el balance general se simplifica al balance de agua:

$$M_p\omega_{p1} + M_a\omega_{a1} = M_p\omega_{p2} + M_a\omega_{a2}$$

A pesar de que se esperan pérdidas de calor considerables en la cámara de secado, estas no se considerarán durante el diseño por motivos de simplificación, y para justificar el uso de la carta psicrométrica en la estimación de temperaturas. El balance es el siguiente:

$$Q + H_{p1} + M_aH_{a0} = Q_w + H_{p2} + M_aH_{a2}$$

$$Q - Q_w = H_{p2} - H_{p1} + M_a(H_{a2} - H_{a0})$$

Las pérdidas de energía en el colector solar se expresan por medio de la eficiencia del colector ( $\mu$ ). Siendo la eficiencia la fracción de la energía de entrada que efectivamente se usa en el proceso, y las pérdidas son el complemento ( $1-\mu$ ):

$$Q_w = Q(1 - \mu) = Q - Q\mu$$

Además, el cambio de entalpía del sólido se puede expresar como la suma de dos procesos: uno es el calentamiento del sólido sin el contenido de agua, y el otro la diferencia de entalpías de los contenidos de humedad asociados al sólido:

$$H_{p2} - H_{p1} = C_p M_p (T_f - T_{p1}) + M_p \omega_{p2} H_{w2} - M_p \omega_{p1} H_{w1}$$

Donde  $H_{w2}$  y  $H_{w1}$  son las entalpías de agua saturada a las temperaturas  $T_f$  y  $T_{p1}$  respectivamente.

Todo esto permite reescribir el balance de energía de la siguiente manera:

$$Q - (Q - Q\mu) = C_p M_p (T_f - T_{p1}) + M_p \omega_{p2} H_{w2} - M_p \omega_{p1} H_{w1} + M_a (H_{a2} - H_{a0})$$

$$Q\mu = M_p [C_p (T_f - T_{p1}) + \omega_{p2} H_{w2} - \omega_{p1} H_{w1}] + M_a (H_{a2} - H_{a0})$$

Las ecuaciones de balance se resumen en la tabla II.

Tabla II. **Ecuaciones de balance de masa y energía para el secador**

Balance de masa	$M_p \omega_{p1} + M_a \omega_{a1} = M_p \omega_{p2} + M_a \omega_{a2}$
Balance de energía	$Q\mu = M_p [C_p (T_f - T_{p1}) + \omega_{p2} H_{w2} - \omega_{p1} H_{w1}] + M_a (H_{a2} - H_{a0})$

Fuente: elaboración propia, con base en la figura 11.

### 3.6.2. Análisis de transferencia de masa

McCabe explica que, en un secador la velocidad de secado está condicionada en mayor grado por la transferencia de masa, y no por la transferencia de calor, especialmente en un secador de bandeja. Para simplificar el análisis de transferencia de masa, se considera únicamente el periodo de velocidad de secado constante, que es en el que se remueve la mayor cantidad de humedad del sólido; y en este periodo el sólido está cubierto constantemente por una capa de líquido en contacto directo con el aire de secado, que, ordenado en las bandejas, funciona como una serie de láminas horizontales sobre las cuales circula aire de secado. Esto significa que el sistema se puede analizar como un caso de transferencia convectiva de masa entre una superficie límite tipo lámina horizontal y un fluido en movimiento.

En su libro sobre fenómenos de transporte Welty, Wicks, Wilson y Rorrer realizan un análisis de transferencia de masa entre una lámina horizontal y un fluido en movimiento, considerando una analogía de la solución de Blasius para las regiones en que el flujo es laminar, y una correlación para las regiones en que el flujo es turbulento, integrándolas en una sola ecuación para calcular el promedio del coeficiente de transferencia de masa:

$$\bar{k}_c = \frac{0,664D_{AB}Re_t^{1/2}Sc^{1/3} + 0,0365D_{AB}Sc^{1/3}[Re_L^{4/5} - Re_t^{4/5}]}{L}; Re_L > 2,0 * 10^5$$

Donde:

$D_{AB}$ = Coeficiente de difusión del soluto en el fluido.

$\bar{k}_c$ = Coeficiente promedio de transferencia de masa.

$L$ = Longitud de la lámina en dirección del flujo.

$Re_L$ = Número de Reynolds al final de la lámina.

$Re_t$  = Número de Reynolds en la transición entre flujo laminar y turbulento, constante,  $2,0 \times 10^5$ .

$Sc$  = Número de Schmidt.

Si el flujo es únicamente laminar, se omite el segundo término del cociente de la ecuación, que representa la correlación para flujo turbulento, y se reemplaza el número de Reynolds del primer término por el número de Reynolds al final de la lámina:

$$\bar{k}_c = \frac{0,664 D_{AB} Re_L^{1/2} Sc^{1/3}}{L}; Re_L < 2,0 * 10^5$$

El valor del número de Reynolds al final de la lámina es el que determina la ecuación a utilizar, y este se calcula de la siguiente manera:

$$Re_L = \frac{v_\infty L}{\nu}$$

Donde:

$v_\infty$  = Velocidad de flujo

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido

También se hace necesario calcular el número de Schmidt:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

### 3.6.3. Criterios de diseño

El diseño y construcción del secador experimental se fundamentó en los siguientes criterios y suposiciones:

Se determinó que el secador funcione para secar 1 kg de materia prima en 12 horas. La *guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes* del año 2005, de la Fundación Celestina Pérez de Almada, en cooperación con la UNESCO, registra, como una aproximación, que el contenido de humedad de los duraznos (*Prunus persica*), frescos es de 85 %, en base húmeda, y recomienda secarlos hasta un 18 % para su conservación.

Hussein y otros autores estiman un rango de eficiencia para un colector solar de entre 30 % y 50 %, según antecedentes. Para la presente investigación, se estimó un 30 % de eficiencia.

Se supone, para el diseño, que el contacto entre el aire de secado y el sólido es prolongado y que por lo tanto el aire remueve agua del sólido hasta el máximo que puede contener, es decir, la humedad relativa del aire de salida es 100 %. Esto, aunado a la suposición de que no hay pérdidas de calor en la cámara de secado, significa que la temperatura final es la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada.

Cada prueba de secado dio inicio a las 7:00 A.M., por lo que la temperatura inicial del sólido es la temperatura ambiente en ese momento. Según la página de internet El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, la temperatura promedio a esa hora de la mañana es de 13 °C.

El aire de secado entra al colector solar continuamente a lo largo del día, y entra a la temperatura ambiente, la cual varía. Para cálculos de diseño, se consideró esta temperatura constante, siendo el promedio diurno de temperatura, que según la página de internet El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, es de 20 °C. Hussein junto a otros

investigadores, registran un aumento de temperatura del aire de secado cercano a 20 °C respecto de la temperatura ambiente. Suponiendo un aumento similar para los cálculos de diseño, la temperatura del aire que entra a la cámara de secado debe llegar a 40 °C.

Estos criterios, junto con los balances de masa y energía, y el análisis de transferencia de masa, se utilizaron para calcular el área del colector solar, la potencia de la resistencia eléctrica y las dimensiones del secador y sus bandejas; y se resumen en la tabla III. Las dimensiones y materiales para la construcción del secador se basaron además en los artículos consultados como antecedentes.

Tabla III. **Datos de criterios y suposiciones para el diseño del secador**

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Referencia
Carga de materia prima	$M_{p1}$	1 kg	Base de operación.
Tiempo de secado	T	12 h	Base de operación.
Contenido de humedad de la materia prima (base húmeda)	$W_{p1}$	85 %	Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005.
Contenido de humedad deseado para el producto final (base húmeda)	$W_{p2}$	18 %	Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005.
Eficiencia del colector solar	M	30 %	Hussein et al., 2017.
Humedad relativa del aire de salida	$HR_{a2}$	100 %	Parámetro de diseño.

Continuación de la tabla III.

Temperatura de carga de la materia prima	$T_{p1}$	13 °C	El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, 2017.
Temperatura inicial del aire	$T_{a0}$	20 °C	El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, 2017.
Temperatura del aire de secado	$T_{a1}$	40 °C	Hussein et al., 2017; Khama et al., 2016; Reyes et al., 2014.

Fuente: elaboración propia, con base a las referencias especificadas de investigaciones sobre secado solar.

### 3.6.4. Dimensiones y construcción del secador

A partir del balance de masa y energía, utilizando los criterios de diseño, se calculó la demanda de potencia del equipo “ $\dot{Q}$ ”. Este valor se utilizó junto con la radiación incidente promedio, para calcular el área del colector:

$$A_c = \frac{\dot{Q}}{E_e}$$

Donde:

$A_c$ = Área del colector solar.

$\dot{Q}$  = Demanda de potencia del equipo.

$E_e$ = Irradiancia solar incidente promedio.

Así también, el coeficiente promedio de transferencia de masa calculado se relacionó con el área de transferencia de masa por medio de la ecuación análoga a la ley de enfriamiento de Newton, como lo hace Welty.

$$w_A = \bar{k}_c A (\rho_A^* - \rho_{A\infty})$$
$$A = \frac{w_A}{\bar{k}_c (\rho_A^* - \rho_{A\infty})}$$

Donde:

$A$  = Área de transferencia de masa, es decir, de la bandeja.

$\rho_{A\infty}$  = Concentración del soluto en el fluido, lejos de la superficie límite.

$w_A$  = Flujo promedio del soluto desde la superficie límite.

$\rho_A^*$  = Máximo contenido o solubilidad del soluto en el fluido.

Esto permitió determinar las áreas del colector solar y del conjunto de bandejas. Para la determinación de dimensiones se buscó utilizar las mismas proporciones que sugiere Bowser en sus planos de construcción publicados. La construcción se realizó de acuerdo a estas dimensiones y con los materiales así mismo sugeridos por Bowser.

### 3.6.5. Pruebas de secado

Las pruebas de secado se realizaron según el siguiente procedimiento:

- Pretratamiento de la materia prima
  - Seleccionar la materia prima en buen estado
  - Seleccionar frutas para lograr un peso total aproximado de 250 gramos.

- Lavar las frutas a utilizar en la prueba de secado.
  - Pelar la fruta y cortar las partes que estén muy maduras.
  - Cortar la fruta en rodajas de aproximadamente 4 mm de grosor.
  - Lavar las rodajas con agua limpia.
  - Sumergir las rodajas en agua hirviendo por 30 segundos.
  - Sumergir las rodajas en agua a temperatura ambiente por 30 segundos.
  - Tarar las bandejas en la balanza analítica.
  - Pesar la muestra de control en la balanza analítica, sobre las bandejas.
- Preparación del secador según tipo de secado a realizar

El secador se preparó según el tipo de secado que se realizaría. Para una prueba de secado solar no se encendió la resistencia eléctrica. Si se realiza una prueba de secado híbrido se encendió la resistencia eléctrica. El secador se colocó al aire libre, expuesto a la luz del sol y orientado hacia la dirección en que viene el viento. Después de preparar el secador, se inicia con la prueba de secado.

- Prueba de secado
  - A las 7:00 A.M. colocar ordenadamente las rodajas de fruta en las bandejas del secador.
  - Cerrar el secador.
  - Cada veinte minutos retirar la muestra de control del secador, pesarla en la balanza analítica y reintroducirla en el secador.

- Cada vez que se pese la muestra de control, también tomar mediciones de temperatura ambiente y temperatura a la entrada de la cámara de secado.
- Cuando el peso de la muestra de control sea constante, terminar el proceso, apagar la resistencia eléctrica (si está encendida) y empacar el producto seco.

Cuando fue necesario interrumpir el proceso de secado por condiciones climáticas, durante el secado solar, el producto se empacó herméticamente. Estos datos recolectados son los que se utilizaron para el cálculo de los resultados. Durante las pruebas en secado híbrido, la fuente de calentamiento eléctrico se encendió cada vez que la elevación de la temperatura del aire de secado fue menor a 10 °C, y se apagó cada vez que fue mayor a 40 °C.

### 3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos se recolectaron según el procedimiento de las pruebas de secado, descrito en la sección anterior, y se ordenaron en las siguientes tablas:

Tabla IV. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 1**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
23 de mayo de 2020	7:00	362	18	15
	7:20	353	18	15
	7:40	349	20	16
	8:15	340	22	16
	8:45	326	22	17
	9:00	323	21	17
	9:20	314	21	17
	9:40	308	23	18
	10:00	303	24	18

Continuación de la tabla IV.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
23 de mayo de 2020	10:20	293	24	18
	10:40	286	30	19
	11:00	271	32	19
	11:20	257	31	19
	11:40	236	42	19
	12:00	216	43	19
	12:20	196	43	19
	12:40	175	38	19
	13:00	166	38	19
	13:20	152	42	19
	13:40	142	42	19
	14:00	128	42	19
	14:20	119	38	19
	14:40	119	30	19
	15:00	109	30	19
	15:20	107	27	18
	15:40	103	26	18
	16:00	98	30	18
	16:20	92	29	18
	16:40	87	26	18
16:50	83	26	17	
17:00	81	23	18	
24 de mayo de 2020	7:00	81	22	17
	7:20	75	23	18
	7:50	65	30	18
	8:20	65	44	21
	8:40	65	44	21

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla V. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 2**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
25 de mayo de 2020	7:00	277	19	16
	7:20	266	19	16
	7:40	260	20	17
	8:20	244	25	18
	8:40	237	25	18
	9:00	231	27	18
	9:20	221	36	19
	9:40	207	33	19
	10:00	193	31	18
	10:20	182	33	20
	10:40	177	30	20
	11:00	164	32	20
	11:30	154	34	20
	11:45	142	31	20
	12:00	134	32	20
	12:20	124	34	20
	12:40	113	31	21
	13:00	106	33	21
	13:20	97	36	21
	13:50	88	41	21
14:00	76	49	21	
14:20	60	49	21	
14:40	53	50	21	
15:00	53	50	21	
15:20	53	48	21	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla VI. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 3**

Fecha	Hora	Masa (g)	Temperatura de aire de secado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
27 de mayo de 2020	7:00	280	17	16
	7:30	269	17	16
	7:55	259	18	16
	8:40	243	18	16
	9:00	236	18	16
	9:20	230	18	16
	9:50	221	17	17
	10:20	210	18	16
	10:40	205	19	16
	11:00	196	20	17
	11:20	187	19	16
	11:40	179	19	16
	12:00	171	19	16
	12:20	164	19	16
	12:40	157	19	16
	13:00	151	20	16
	13:30	140	20	16
	14:00	129	20	18
	14:20	126	20	18
	14:40	117	19	18
	15:00	110	19	18
	15:20	104	19	18
	15:40	97	18	18
	16:00	93	19	17
16:20	87	18	17	
16:30	84	18	17	
16:50	79	19	14	
28 de mayo de 2020	7:00	79	20	16
	7:20	76	21	17
	7:40	65	21	17
	8:00	59	21	17
	8:20	53	21	18
	8:40	47	22	18
	9:40	47	28	19
	10:00	47	31	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla VII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 4**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
2 de junio de 2020	7:00	288	15	14
	7:20	282	15	14
	7:40	279	16	14
	8:00	275	16	14
	8:25	271	16	15
	8:40	268	16	15
	9:05	264	16	15
	9:20	262	17	15
	9:45	257	16	15
	10:00	254	16	15
	10:20	251	16	15
	10:40	247	16	15
	11:00	244	16	15
	11:25	240	16	16
	11:40	238	16	16
	12:10	233	16	16
	12:40	227	16	16
	13:00	224	16	16
	13:20	222	16	16
	13:50	217	16	15
	14:20	210	18	15
	14:45	209	17	15
	15:00	205	17	15
	15:20	201	16	15
	15:40	198	17	15
	16:00	194	16	15
	16:20	191	18	15
	16:40	188	18	15
16:50	186	17	15	
17:00	184	15	14	
3 de junio de 2020	7:00	184	14	13
	7:20	181	15	14
	7:40	178	15	15
	8:00	174	15	15
	8:20	170	16	14
	9:00	162	16	15

Continuación de la tabla VII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
3 de junio de 2020	9:20	160	16	15
	9:40	157	16	15
	10:00	153	16	15
	10:20	150	17	16
	10:40	147	16	16
	11:00	144	16	16
	11:25	140	16	16
	11:40	137	16	16
	12:05	134	16	16
	12:20	132	16	16
	12:40	128	16	16
	13:10	124	16	16
	13:50	119	16	15
	14:00	115	16	15
	14:20	112	16	15
	14:40	109	16	15
	15:00	105	16	15
	15:20	103	16	14
	15:40	99	16	14
	16:05	95	16	14
16:40	90	16	14	
17:00	86	16	14	
4 de junio de 2020	7:00	86	15	13
	7:20	82	16	14
	7:40	80	15	14
	8:05	78	15	13
	8:20	75	15	13
	8:40	73	16	13
	9:00	71	16	13
	9:20	68	16	14
	9:40	65	16	14
	10:05	63	16	14
	10:25	61	16	14
	10:40	59	16	14
	11:00	57	16	14

Continuación de la tabla VII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
4 de junio de 2020	11:25	55	16	14
	11:40	52	17	14
	12:05	50	17	15
	12:20	47	16	15
	12:40	46	16	15
	13:00	46	16	13
	13:20	46	16	13

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla VIII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 5**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
5 de junio de 2020	7:00	275	15	14
	7:20	271	16	14
	7:40	268	15	14
	8:15	263	15	14
	8:45	259	15	14
	9:00	257	15	14
	9:20	252	15	13
	9:40	250	15	13
	10:00	246	16	13
	10:20	244	16	13
	10:40	240	16	13
	11:00	236	16	13
	11:20	233	15	14
	11:40	229	15	14
	12:00	227	16	14
	12:20	223	16	14
	12:40	221	15	14
13:00	217	16	14	

Continuación de la tabla VIII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
5 de junio de 2020	13:20	213	15	14
	13:55	209	16	14
	14:20	204	16	14
	14:45	201	16	14
	15:00	199	17	14
	15:20	194	16	14
	15:45	191	17	14
	16:00	189	16	14
	16:20	185	16	14
	16:40	182	16	14
	17:00	178	15	15
6 de junio de 2020	7:00	178	14	14
	7:20	174	15	15
	7:40	164	15	15
	8:10	163	15	15
	8:40	161	15	15
	9:00	157	16	16
	9:20	155	16	16
	9:40	150	18	16
	10:00	141	22	16
	10:20	134	22	16
	10:40	124	20	16
	11:00	115	19	16
	11:20	113	18	16
	11:40	107	18	16
	12:00	101	18	16
	12:20	98	17	16
	12:40	93	17	16
	13:00	88	17	16
	13:25	81	17	16
	13:40	78	17	16
14:00	74	17	16	
14:20	70	17	16	
14:40	64	17	16	
15:00	60	20	16	

Continuación de la tabla VIII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
6 de junio de 2020	15:20	56	18	16
	15:45	54	18	16
	16:05	51	17	16
	16:20	49	18	16
	16:40	43	23	18
	17:00	43	25	18
	17:20	43	25	18

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla IX. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 6**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
8 de junio de 2020	7:00	239	17	16
	7:20	234	17	17
	7:45	227	18	17
	8:00	219	18	17
	8:25	209	19	18
	8:40	201	20	18
	9:05	187	23	18
	9:20	177	23	19
	9:40	166	23	19
	10:00	154	26	19
	10:20	143	27	19
	10:40	130	27	20
	11:00	117	24	20
	11:20	106	26	20
	11:40	95	28	21
	12:00	83	26	20
12:20	70	28	20	
12:50	53	24	20	

Continuación de la tabla IX.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
8 de junio de 2020	13:30	40	23	20
	14:00	40	25	20
	14:20	40	22	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla X. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 7**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
9 de junio de 2020	7:00	360	16	16
	7:20	351	18	17
	7:40	344	20	17
	8:00	338	20	17
	8:25	328	20	18
	8:45	319	23	18
	9:05	308	25	18
	9:20	297	23	19
	9:45	285	22	19
	10:00	278	23	19
	10:20	266	23	17
	10:40	256	25	17
	11:00	246	22	18
	11:25	230	23	18
	11:45	222	24	18
	12:00	213	25	18
	12:25	196	25	18
	12:45	189	26	18
	13:20	179	25	19
	14:15	138	24	19
14:25	124	24	19	
15:00	117	26	18	
15:25	104	26	18	

Continuación de la tabla X.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
9 de junio de 2020	15:40	96	26	18
	16:10	86	22	18
	16:35	78	22	18
	16:55	71	20	20
10 de junio de 2020	7:00	71	20	19
	7:20	66	21	20
	7:40	57	25	20
	8:00	57	24	21
	8:20	57	24	21

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XI. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 8**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
13 de junio de 2020	7:00	310	15	13
	7:20	310	15	14
	7:40	305	16	14
	8:10	294	17	15
	8:45	281	18	15
	9:00	274	19	15
	9:20	264	23	16
	9:40	251	25	16
	10:05	236	27	16
	10:20	224	24	17
	10:40	211	25	17
	11:00	202	22	17
	11:20	190	22	18
	11:40	183	21	18
	12:00	172	22	18
12:20	163	23	18	
12:40	153	21	18	

Continuación de la tabla XI.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
13 de junio de 2020	13:00	145	22	18
	13:30	132	21	18
	14:00	123	20	18
	14:25	110	27	18
	14:40	103	31	18
	15:00	90	31	18
	15:20	80	28	18
	15:40	72	25	17
	16:00	67	23	17
	16:25	62	21	17
	16:40	60	20	17
	17:00	57	20	17
14 de junio de 2020	7:00	57	16	16
	7:20	55	17	17
	7:40	53	19	17
	8:00	52	19	17
	8:20	48	19	17
	8:40	48	19	17
	9:00	48	19	18

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 9**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
19 de junio de 2020	7:00	272	16	15
	7:20	268	15	15
	7:50	261	19	15
	8:20	248	18	16
	8:40	242	17	16
	9:00	235	17	16
	9:20	230	19	17

Continuación de la tabla XII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
19 de junio de 2020	9:40	223	19	17
	10:00	217	21	17
	10:20	207	21	17
	10:40	196	23	19
	11:00	186	23	19
	11:30	176	20	20
	12:15	166	20	20
	12:40	160	20	20
	13:00	156	20	20
	13:20	152	20	19
	13:50	146	18	17
	14:20	139	18	17
	14:45	135	19	17
	15:15	128	20	17
	15:40	123	19	17
	16:00	118	18	17
	16:25	113	19	16
	16:40	110	19	16
16:50	109	19	16	
17:00	106	19	16	
20 de junio de 2020	7:00	106	21	15
	7:25	98	22	16
	7:40	90	25	18
	8:00	79	26	18
	8:20	65	27	18
	8:40	50	28	18
	9:00	50	30	18
	9:20	50	29	18

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XIII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 10**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
21 de junio de 2020	7:00	169	15	14
	7:25	163	16	15
	7:40	159	16	15
	8:00	153	16	15
	8:20	148	16	15
	8:40	142	19	16
	9:00	132	21	16
	9:20	122	25	16
	10:10	98	28	17
	10:40	72	31	18
	11:00	63	28	18
	11:20	53	28	19
	11:40	44	29	19
	12:00	37	25	19
	12:20	29	27	19
	12:40	27	26	20
13:05	27	23	20	
13:40	27	23	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XIV. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 11**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
22 de junio de 2020	7:00	146	16	15
	7:20	141	16	15
	7:40	136	16	16
	8:10	129	16	16
	8:45	126	17	16
	9:00	124	18	16
	9:20	120	18	16
	9:40	116	17	17

Continuación de la tabla XIV.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
22 de junio de 2020	10:00	112	17	17
	10:20	108	18	17
	10:40	103	18	18
	11:00	99	18	18
	11:20	96	18	18
	12:00	89	20	20
	12:20	85	20	20
	12:40	81	20	20
	13:05	78	20	20
	13:25	75	19	19
	13:45	70	19	19
	14:05	66	19	19
	14:20	65	19	19
	14:40	61	18	18
	15:00	58	18	18
	15:20	54	18	18
	15:40	50	19	18
	16:00	46	18	18
16:20	45	18	18	
17:00	39	18	17	
23 de junio de 2020	7:00	39	17	14
	7:25	32	18	15
	7:40	29	19	16
	8:00	23	21	16
	8:20	23	23	17
	8:40	23	25	17

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XV. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 12**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
25 de junio de 2020	7:00	178	15	15
	7:25	172	16	15
	7:45	165	16	15
	8:10	154	19	16
	8:20	146	19	16
	8:40	137	21	16
	9:00	124	24	17
	9:20	113	27	17
	9:40	99	28	17
	10:00	86	30	17
	10:20	72	31	18
	10:40	58	31	18
	11:00	46	28	18
	11:20	33	30	19
	11:40	33	28	19
12:00	33	28	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XVI. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 13**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
28 de junio de 2020	7:00	333	16	14
	7:20	328	17	15
	7:40	321	19	15
	8:10	306	19	15
	8:25	298	18	16
	8:40	290	18	16
	9:10	279	18	16
	10:05	258	18	18
	10:30	254	18	18
	10:45	250	18	18

Continuación de la tabla XVI.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
28 de junio de 2020	11:05	244	18	18
	11:25	239	18	18
	11:45	233	18	18
	12:05	228	19	19
	12:25	221	19	19
	12:55	213	19	19
	13:10	209	19	18
	13:40	201	18	18
	14:15	191	18	17
	14:35	185	19	17
	14:50	181	20	17
	15:20	172	18	16
	15:45	165	19	16
	16:05	159	19	17
	16:40	152	19	17
17:00	149	16	15	
29 de junio de 2020	7:00	149	17	14
	7:30	142	18	15
	7:50	135	18	15
	8:05	131	19	16
	8:20	124	21	16
	8:45	112	25	17
	9:10	96	27	17
	9:25	84	25	17
	9:40	76	25	18
	10:00	64	28	18
	10:25	50	28	18
	10:40	50	24	18
11:00	50	22	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XVII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 14**

Fecha	Hora	Masa (g)	Temperatura de aire de secado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
2 de julio de 2020	7:00	268	16	13
	7:20	261	16	14
	7:40	256	17	14
	8:00	250	19	14
	8:25	242	19	15
	8:40	235	19	15
	9:00	227	19	15
	9:20	220	19	15
	9:40	212	23	16
	10:00	202	25	16
	10:20	196	26	16
	10:40	178	25	17
	11:00	167	27	17
	11:20	156	26	17
	11:40	142	22	17
	12:00	135	19	17
	12:20	130	19	17
	12:45	122	19	18
	13:00	115	19	18
	13:20	107	20	18
	13:40	101	20	17
	14:10	93	20	17
	14:25	87	20	17
	14:40	84	20	17
	15:00	78	20	17
	15:20	74	20	16
	15:40	69	20	16
	16:00	65	20	16
16:20	61	20	16	
16:40	57	20	16	
17:00	52	20	16	
3 de julio de 2020	7:00	52	17	13
	7:30	45	18	14
	7:45	44	18	15
	8:00	44	18	15
	8:20	44	18	15

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XVIII. **Datos de la prueba de secado solar, repetición 15**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
4 de julio de 2020	7:00	333	16	14
	7:20	325	16	14
	7:40	318	16	15
	8:00	314	16	15
	8:20	308	18	15
	8:45	300	18	16
	9:00	292	20	16
	9:20	282	22	16
	9:40	272	24	16
	10:00	253	25	16
	10:20	243	25	16
	10:40	231	25	17
	11:00	215	25	17
	11:20	203	25	17
	11:40	193	25	18
	12:00	180	25	18
	12:25	166	25	18
	12:40	155	25	19
	13:00	141	25	19
	13:20	129	26	19
	13:40	116	27	18
	14:00	102	25	18
	14:20	92	25	18
	14:40	85	21	18
	15:00	78	23	18
	15:25	72	20	18
	15:40	68	19	17
	16:00	64	19	17
	16:20	59	19	17
	16:40	54	18	17
17:00	51	18	17	
17:20	51	18	18	
17:40	51	18	17	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XIX. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 1**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
26 de mayo de 2020	7:00	310	20	16
	7:20	306	24	17
	7:40	296	28	17
	8:05	289	25	18
	8:20	283	29	18
	8:40	273	30	18
	9:00	262	32	18
	9:25	238	38	19
	9:40	224	44	19
	10:00	201	44	19
	10:25	177	41	20
	10:40	165	40	20
	11:00	150	39	20
	11:20	134	39	21
	11:40	125	40	21
	12:00	109	42	21
	12:20	92	43	21
	12:40	79	43	21
	13:00	68	38	21
	13:20	57	36	20
13:50	57	37	20	
14:20	57	34	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XX. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 2**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
29 de mayo de 2020	7:00	217	16	13
	7:20	206	21	13
	7:40	197	21	13
	8:05	186	20	13

Continuación de la tabla XX.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
29 de mayo de 2020	8:25	181	23	14
	8:40	175	22	14
	9:00	168	32	14
	9:20	154	28	17
	9:40	144	24	17
	10:00	138	25	17
	10:20	129	27	17
	10:40	120	23	17
	11:00	114	24	17
	11:20	107	29	18
	11:40	97	24	18
	12:00	92	23	18
	12:20	87	18	18
	12:40	81	22	18
	13:00	77	24	18
	13:20	75	21	18
	13:40	69	20	18
	14:00	65	34	17
	14:25	60	20	17
	14:45	56	21	17
	15:00	53	20	17
	15:20	49	20	16
	15:40	47	23	16
	16:00	44	22	16
	16:20	39	21	15
	16:40	36	22	15
	17:00	34	36	15
	17:20	34	21	15
17:40	34	21	15	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXI. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 3**

Fecha	Hora	Masa (g)	Temperatura de aire de secado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
30 de mayo de 2020	7:00	238	17	14
	7:20	228	25	14
	7:40	221	24	16
	8:00	212	21	16
	8:20	206	24	16
	8:40	199	25	16
	9:00	191	23	16
	9:20	183	22	16
	9:40	176	23	16
	10:00	170	21	16
	10:25	161	52	16
	10:45	155	45	16
	11:00	150	35	16
	11:25	141	29	15
	11:40	137	47	15
	12:00	130	35	15
	12:20	124	30	15
	12:40	117	31	15
	13:00	111	39	15
	13:20	106	26	15
	13:40	100	25	15
	14:00	93	25	15
	14:20	90	31	14
	14:40	82	28	14
	15:00	79	39	14
	15:20	74	21	14
	15:40	66	48	14
	16:00	62	38	14
	16:20	57	21	15
	16:40	51	21	15
17:00	47	22	15	
17:30	42	22	15	
18:00	42	22	15	
18:20	42	22	14	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXII. Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 4

Fecha	Hora	Masa (g)	Temperatura de aire de secado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
31 de mayo de 2020	7:00	350	35	13
	7:20	336	29	13
	7:40	327	28	13
	8:00	317	27	13
	8:20	309	23	13
	8:40	303	23	13
	9:00	295	23	14
	9:20	287	23	14
	9:40	280	22	14
	10:00	272	21	14
	10:20	266	21	14
	10:40	257	21	17
	11:10	245	23	17
	11:20	242	22	17
	11:40	236	23	17
	12:05	226	40	17
	12:20	220	22	13
	12:40	213	20	13
	13:00	205	23	13
	13:30	194	25	13
	14:00	185	25	13
	14:20	177	38	14
	14:40	171	36	14
	15:00	166	40	14
	15:20	157	43	14
	15:40	150	46	14
	16:00	143	45	14
	16:20	138	50	14
	16:50	126	26	14
	17:20	118	22	14
17:40	112	22	14	
18:00	106	22	14	
18:20	100	22	14	
18:40	94	22	14	
19:00	87	20	11	

Continuación de la tabla XXII.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
1 de junio de 2020	7:00	87	44	13
	7:20	81	45	14
	7:40	76	45	14
	8:00	71	35	14
	8:20	65	28	14
	8:40	59	24	15
	9:00	54	21	16
	9:20	54	20	16
	9:40	54	20	15

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXIII. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 5**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
11 de junio de 2020	7:00	230	16	15
	7:20	214	24	15
	7:40	204	22	11
	8:10	186	26	12
	8:45	166	32	15
	9:10	147	39	16
	9:35	132	35	16
	10:10	98	40	16
	10:25	95	40	17
	11:10	73	33	17
	11:40	53	35	18
	12:00	43	45	18
	12:20	37	39	18
	12:40	37	37	19
	13:00	37	35	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXIV. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 6**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
12 de junio de 2020	7:00	279	15	13
	7:30	261	19	15
	8:00	246	23	15
	8:20	232	27	15
	8:40	217	27	16
	9:00	202	33	16
	9:20	186	35	16
	9:40	166	38	17
	10:00	148	38	17
	10:20	127	41	17
	10:40	108	40	18
	11:05	86	41	18
	11:30	66	41	18
	12:00	46	35	18
	12:20	46	35	19
12:40	46	36	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXV. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 7**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
15 de junio de 2020	7:00	202	16	14
	7:20	192	19	15
	7:40	179	21	15
	8:00	169	25	11
	8:20	155	28	11
	8:40	142	28	13
	9:00	129	25	16
	9:20	119	25	16
	9:40	107	31	17
	10:00	96	27	17

Continuación de tabla XXV.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
15 de junio de 2020	10:25	85	24	17
	10:45	71	34	18
	11:00	63	31	18
	11:20	56	29	18
	11:40	45	25	18
	12:05	38	31	18
	12:20	32	31	18
	12:40	32	31	19
	13:00	32	37	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXVI. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 8**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
16 de junio de 2020	7:00	196	16	14
	7:20	191	23	14
	7:55	175	29	15
	8:30	158	23	16
	9:05	137	51	16
	9:20	126	25	17
	9:40	116	29	17
	10:00	104	34	17
	10:20	89	34	18
	10:40	78	40	18
	11:00	63	33	18
	11:20	55	23	18
	11:45	42	33	18
	12:00	37	35	18
	12:20	37	33	19
	12:40	37	52	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXVII. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 9**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
17 de junio de 2020	7:00	253	16	14
	7:20	249	24	14
	7:40	238	27	14
	8:00	229	26	14
	8:20	219	45	14
	8:45	206	26	15
	9:00	200	31	15
	9:20	187	35	15
	9:40	177	42	15
	10:00	166	36	16
	10:20	155	30	17
	10:40	146	26	17
	11:00	136	33	17
	11:20	125	26	18
	11:40	117	35	18
	12:00	107	25	18
	12:20	99	32	18
	12:40	91	28	18
	13:00	84	25	18
	13:20	75	34	18
13:40	67	25	18	
14:50	43	40	17	
15:45	43	25	17	
16:05	43	44	16	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXVIII. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 10**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
18 de junio de 2020	7:00	301	16	14
	7:20	295	19	14
	7:40	281	25	14
	8:00	271	23	14
	8:20	258	30	14
	8:40	242	30	16
	9:00	225	30	16
	9:20	212	31	16
	9:40	200	31	16
	10:05	184	31	17
	10:20	172	31	17
	10:40	162	32	17
	11:00	147	35	17
	11:20	127	40	18
	11:45	110	36	18
	12:00	100	28	18
	12:25	87	31	18
	12:40	77	29	18
	13:00	66	39	18
	13:20	58	29	18
	13:40	47	25	18
	14:20	47	30	18
	14:40	47	32	17

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXIX. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 11**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
24 de junio de 2020	7:00	183	16	14
	7:20	172	22	11
	7:50	159	22	11
	8:25	143	27	12
	8:40	133	31	12
	9:00	122	38	13
	9:25	106	38	13
	9:50	93	35	13
	10:00	83	37	15
	10:25	69	36	15
	10:45	55	36	15
	11:20	36	36	16
	11:40	29	30	16
	12:05	29	25	19
12:30	29	26	19	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXX. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 12**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
26 de junio de 2020	7:00	243	15	14
	7:20	227	22	14
	7:45	209	40	14
	8:00	196	30	14
	8:25	178	31	16
	8:40	163	33	16
	9:00	144	35	16
	9:20	128	35	17
	9:40	116	45	17
	10:00	97	41	17
	10:20	79	41	18

Continuación de la tabla XXX.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
26 de junio de 2020	10:40	64	41	18
	11:00	45	42	18
	11:25	45	42	19
	11:50	45	40	19

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXXI. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 13**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
27 de junio de 2020	7:00	361	16	13
	7:20	348	28	13
	7:40	332	32	14
	8:00	322	28	14
	8:20	303	28	15
	8:40	289	28	15
	9:00	273	30	15
	9:20	252	32	17
	9:35	241	35	17
	10:00	210	39	17
	10:20	187	40	18
	10:40	165	41	18
	11:00	142	41	18
	11:20	119	41	19
	11:40	102	42	19
	12:00	83	41	19
	12:20	70	41	19
	12:40	55	41	19
	13:00	55	38	19
	13:20	55	39	20

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXXII. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 14**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
30 de junio de 2020	7:00	280	18	15
	7:20	269	33	15
	7:40	260	40	14
	8:05	247	23	14
	8:20	238	27	14
	8:40	222	25	15
	9:05	211	24	15
	9:20	196	29	16
	9:45	175	31	16
	10:15	148	35	17
	11:05	95	40	17
	11:20	76	40	17
	11:40	60	40	17
	12:10	60	40	17
12:25	60	50	18	

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

Tabla XXXIII. **Datos de la prueba de secado híbrido, repetición 15**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura de aire de secado (°C)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>
1 de julio de 2020	7:00	304	15	14
	7:20	290	23	15
	7:40	278	24	15
	8:05	264	23	15
	8:25	248	30	16
	8:45	231	30	16
	9:00	216	34	16
	9:20	193	39	17
	9:40	171	40	17
	10:00	148	40	17
	10:20	122	41	18

Continuación de la tabla XXXIII.

Fecha	Hora	Masa (g)	Temperatura de aire de secado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
1 de julio de 2020	10:40	106	41	18
	11:00	80	41	18
	11:20	59	42	18
	11:40	59	42	18
	12:00	59	42	18

Fuente: elaboración propia, con base en los datos experimentales.

### 3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La hora de los datos de las pruebas de secado se convirtió a tiempo de secado, siendo la diferencia de tiempo respecto de las 7:00 A.M., la hora de inicio del proceso, sin tomar en cuenta el tiempo en que el proceso se interrumpe cuando se tomó más de un día. La masa se utilizó para calcular el contenido de humedad (base seca), correspondiente al tiempo de secado, de la siguiente manera:

$$\omega_p = [m_p - m_{p1}(1 - W_{p1})] / [m_{p1}(1 - W_{p1})]$$

Donde:

$\omega_p$  = Contenido de humedad del sólido (base seca).

$W_{p1}$  = Contenido de humedad inicial del sólido (base húmeda).

$m_p$  = Masa del sólido.

$m_{p1}$  = Masa inicial del sólido.

El contenido de humedad inicial que se utilizó para todos los cálculos fue de 85 %, según recomienda la Fundación Celestina Pérez de Almada. Se

calculó la elevación de temperatura del aire de secado como la diferencia entre la temperatura de aire de secado y la temperatura ambiente. También se calculó la velocidad de secado como el cambio en el contenido de humedad del sólido dividido el cambio en el tiempo de secado:

$$V = \Delta \omega_p / \Delta t$$

Donde:

$\Delta \omega_p$  = Diferencia absoluta de contenido de humedad del sólido entre dos mediciones.

$\Delta t$  = Diferencia absoluta de tiempo de secado entre dos mediciones.

V = Velocidad de secado.

Cada valor de velocidad se calculó entre dos datos sucesivos de las tablas de la sección anterior, y es un valor puntual asociado al último de los dos datos utilizados. Los datos calculados se ordenaron en las tablas que siguen en esta sección.

Tabla XXXIV. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 1**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub> * min))</b>
0	5,6667	3	
20	5,5009	3	0,0083
40	5,4273	4	0,0037
75	5,2615	6	0,0047
105	5,0037	5	0,0086
120	4,9484	4	0,0037
140	4,7827	4	0,0083
160	4,6722	5	0,0055
180	4,5801	6	0,0046
200	4,3959	6	0,0092

Continuación de la tabla XXXIV.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
220	4,267	11	0,0064
240	3,9908	13	0,0138
260	3,733	12	0,0129
280	3,3462	23	0,0193
300	2,9779	24	0,0184
320	2,6096	24	0,0184
340	2,2228	19	0,0193
360	2,0571	19	0,0083
380	1,7993	23	0,0129
400	1,6151	23	0,0092
420	1,3573	23	0,0129
440	1,1915	19	0,0083
460	1,1915	11	0
480	1,0074	11	0,0092
500	0,9705	9	0,0018
520	0,8969	8	0,0037
540	0,8048	12	0,0046
560	0,6943	11	0,0055
580	0,6022	8	0,0046
590	0,5285	9	0,0074
600	0,4917	5	0,0037
620	0,3812	5	0,0055
650	0,1971	12	0,0061
680	0,1971	23	0
700	0,1971	23	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla IV.

Tabla XXXV. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 2

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	3	
20	5,4019	3	0,0132
40	5,2575	3	0,0072
80	4,8724	7	0,0096
100	4,704	7	0,0084
120	4,5596	9	0,0072
140	4,3189	17	0,012
160	3,9819	14	0,0168
180	3,645	13	0,0168
200	3,3803	13	0,0132
220	3,2599	10	0,006
240	2,9471	12	0,0156
270	2,7064	14	0,008
285	2,4176	11	0,0193
300	2,225	12	0,0128
320	1,9844	14	0,012
340	1,7196	10	0,0132
360	1,5511	12	0,0084
380	1,3345	15	0,0108
410	1,1179	20	0,0072
420	0,8291	28	0,0289
440	0,444	28	0,0193
460	0,2756	29	0,0084
480	0,2756	29	0
500	0,2756	27	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla V.

Tabla XXXVI. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 3

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	1	
30	5,4048	1	0,0087
55	5,1667	2	0,0095
100	4,7857	2	0,0085
120	4,619	2	0,0083
140	4,4762	2	0,0071
170	4,2619	0	0,0071
200	4	2	0,0087
220	3,881	3	0,006
240	3,6667	3	0,0107
260	3,4524	3	0,0107
280	3,2619	3	0,0095
300	3,0714	3	0,0095
320	2,9048	3	0,0083
340	2,7381	3	0,0083
360	2,5952	4	0,0071
390	2,3333	4	0,0087
420	2,0714	2	0,0087
440	2	2	0,0036
460	1,7857	1	0,0107
480	1,619	1	0,0083
500	1,4762	1	0,0071
520	1,3095	0	0,0083
540	1,2143	2	0,0048
560	1,0714	1	0,0071
570	1	1	0,0071
590	0,881	5	0,006
610	0,8095	4	0,0036
630	0,5476	4	0,0131
650	0,4048	4	0,0071
670	0,2619	3	0,0071
690	0,119	4	0,0071
750	0,119	9	0
770	0,119	12	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla VI.

Tabla XXXVII. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición

4

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	1	
20	5,5278	1	0,0069
40	5,4583	2	0,0035
60	5,3657	2	0,0046
85	5,2731	1	0,0037
100	5,2037	1	0,0046
125	5,1111	1	0,0037
140	5,0648	2	0,0031
165	4,9491	1	0,0046
180	4,8796	1	0,0046
200	4,8102	1	0,0035
220	4,7176	1	0,0046
240	4,6481	1	0,0035
265	4,5556	0	0,0037
280	4,5093	0	0,0031
310	4,3935	0	0,0039
340	4,2546	0	0,0046
360	4,1852	0	0,0035
380	4,1389	0	0,0023
410	4,0231	1	0,0039
440	3,8611	3	0,0054
465	3,838	2	0,0009
480	3,7454	2	0,0062
500	3,6528	1	0,0046
520	3,5833	2	0,0035
540	3,4907	1	0,0046
560	3,4213	3	0,0035
580	3,3519	3	0,0035
590	3,3056	2	0,0046
600	3,2593	1	0,0046
620	3,1898	1	0,0035
640	3,1204	0	0,0035
660	3,0278	0	0,0046
680	2,9352	2	0,0046
720	2,75	1	0,0046

Continuación de la tabla XXXVII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
740	2,7037	1	0,0023
760	2,6343	1	0,0035
780	2,5417	1	0,0046
800	2,4722	1	0,0035
820	2,4028	0	0,0035
840	2,3333	0	0,0035
865	2,2407	0	0,0037
880	2,1713	0	0,0046
905	2,1019	0	0,0028
920	2,0556	0	0,0031
940	1,963	0	0,0046
970	1,8704	0	0,0031
1 000	1,7546	1	0,0039
1 020	1,662	1	0,0046
1 040	1,5926	1	0,0035
1 060	1,5231	1	0,0035
1 080	1,4306	1	0,0046
1 100	1,3843	2	0,0023
1 120	1,2917	2	0,0046
1 145	1,1991	2	0,0037
1 180	1,0833	2	0,0033
1 200	0,9907	2	0,0046
1 220	0,8981	2	0,0046
1 240	0,8519	1	0,0023
1 265	0,8056	2	0,0019
1 280	0,7361	2	0,0046
1 300	0,6898	3	0,0023
1 320	0,6435	3	0,0023
1 340	0,5741	2	0,0035
1 360	0,5046	2	0,0035
1 385	0,4583	2	0,0019
1 405	0,412	2	0,0023
1 420	0,3657	2	0,0031
1 440	0,3194	2	0,0023

Continuación de la tabla XXXVII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
1 465	0,2731	2	0,0019
1 480	0,2037	3	0,0046
1 505	0,1574	2	0,0019
1 520	0,088	1	0,0046
1 540	0,0648	1	0,0012
1 560	0,0648	3	0
1 580	0,0648	3	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla VII.

Tabla XXXVIII. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición**

5

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	1	
20	5,5697	2	0,0048
40	5,497	1	0,0036
75	5,3758	1	0,0035
105	5,2788	1	0,0032
120	5,2303	1	0,0032
140	5,1091	2	0,0061
160	5,0606	2	0,0024
180	4,9636	3	0,0048
200	4,9152	3	0,0024
220	4,8182	3	0,0048
240	4,7212	3	0,0048
260	4,6485	1	0,0036

Continuación de la tabla XXXVIII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
280	4,5515	1	0,0048
300	4,503	2	0,0024
320	4,4061	2	0,0048
340	4,3576	1	0,0024
360	4,2606	2	0,0048
380	4,1636	1	0,0048
415	4,0667	2	0,0028
440	3,9455	2	0,0048
465	3,8727	2	0,0029
480	3,8242	3	0,0032
500	3,703	2	0,0061
525	3,6303	3	0,0029
540	3,5818	2	0,0032
560	3,4848	2	0,0048
580	3,4121	2	0,0036
600	3,3152	0	0,0048
620	3,2182	0	0,0048
640	2,9758	0	0,0121
670	2,9515	0	0,0008
700	2,903	0	0,0016
720	2,8061	0	0,0048
740	2,7576	0	0,0024
760	2,6364	2	0,0061
780	2,4182	6	0,0109
800	2,2485	6	0,0085
820	2,0061	4	0,0121
840	1,7879	3	0,0109
860	1,7394	2	0,0024
880	1,5939	2	0,0073
900	1,4485	2	0,0073
920	1,3758	1	0,0036
940	1,2545	1	0,0061
960	1,1333	1	0,0061
985	0,9636	1	0,0068

Continuación de la tabla XXXVIII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
1 000	0,8909	1	0,0048
1 020	0,7939	1	0,0048
1 040	0,697	1	0,0048
1 060	0,5515	1	0,0073
1 080	0,4545	4	0,0048
1 100	0,3576	2	0,0048
1 125	0,3091	2	0,0019
1 145	0,2364	1	0,0036
1 160	0,1879	2	0,0032
1 180	0,0424	5	0,0073
1 200	0,0424	7	0
1 220	0,0424	7	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla VIII.

Tabla XXXIX. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 6**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	1	
20	5,5272	0	0,007
45	5,3319	1	0,0078
60	5,1088	1	0,0149
85	4,8298	1	0,0112
100	4,6067	2	0,0149
125	4,2162	5	0,0156
140	3,9372	4	0,0186
160	3,6304	4	0,0153
180	3,2957	7	0,0167

Continuación de la tabla XXXIX.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
200	2,9888	8	0,0153
220	2,6262	7	0,0181
240	2,2636	4	0,0181
260	1,9568	6	0,0153
280	1,6499	7	0,0153
300	1,3152	6	0,0167
320	0,9526	8	0,0181
350	0,4784	4	0,0158
390	0,1158	3	0,0091
420	0,1158	5	0
440	0,1158	3	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla IX.

Tabla XL. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 7**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	0	
20	5,5	1	0,0083
40	5,3704	3	0,0065
60	5,2593	3	0,0056
85	5,0741	2	0,0074
105	4,9074	5	0,0083
125	4,7037	7	0,0102
140	4,5	4	0,0136
165	4,2778	3	0,0089
180	4,1481	4	0,0086
200	3,9259	6	0,0111

Continuación de la tabla XL.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
220	3,7407	8	0,0093
240	3,5556	4	0,0093
265	3,2593	5	0,0119
285	3,1111	6	0,0074
300	2,9444	7	0,0111
325	2,6296	7	0,0126
345	2,5	8	0,0065
380	2,3148	6	0,0053
435	1,5556	5	0,0138
465	1,2963	5	0,0086
480	1,1667	8	0,0086
505	0,9259	8	0,0096
520	0,7778	8	0,0099
550	0,5926	4	0,0062
575	0,4444	4	0,0059
595	0,3148	0	0,0065
615	0,2222	1	0,0046
635	0,0556	5	0,0083
655	0,0556	3	0
675	0,0556	3	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla X.

Tabla XLI. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 8

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	2	
20	5,6667	1	0
40	5,5591	2	0,0054
70	5,3226	2	0,0079
105	5,043	3	0,008
120	4,8925	4	0,01
140	4,6774	7	0,0108
160	4,3978	9	0,014
185	4,0753	11	0,0129
200	3,8172	7	0,0172
220	3,5376	8	0,014
240	3,3441	5	0,0097
260	3,086	4	0,0129
280	2,9355	3	0,0075
300	2,6989	4	0,0118
320	2,5054	5	0,0097
340	2,2903	3	0,0108
360	2,1183	4	0,0086
390	1,8387	3	0,0093
420	1,6452	2	0,0065
445	1,3656	9	0,0112
460	1,2151	13	0,01
480	0,9355	13	0,014
500	0,7204	10	0,0108
520	0,5484	8	0,0086
540	0,4409	6	0,0054
565	0,3333	4	0,0043
580	0,2903	3	0,0029
600	0,2258	3	0,0032
620	0,1828	0	0,0022
640	0,1398	2	0,0022
660	0,1183	2	0,0011
680	0,0323	2	0,0043
700	0,0323	2	0
720	0,0323	1	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XI.

Tabla XLII. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 9

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	1	
20	5,5686	0	0,0049
50	5,3971	4	0,0057
80	5,0784	2	0,0106
100	4,9314	1	0,0074
120	4,7598	1	0,0086
140	4,6373	2	0,0061
160	4,4657	2	0,0086
180	4,3186	4	0,0074
200	4,0735	4	0,0123
220	3,8039	4	0,0135
240	3,5588	4	0,0123
270	3,3137	0	0,0082
315	3,0686	0	0,0054
340	2,9216	0	0,0059
360	2,8235	0	0,0049
380	2,7255	1	0,0049
410	2,5784	1	0,0049
440	2,4069	1	0,0057
465	2,3088	2	0,0039
495	2,1373	3	0,0057
520	2,0147	2	0,0049
540	1,8922	1	0,0061
565	1,7696	3	0,0049
580	1,6961	3	0,0049
590	1,6716	3	0,0025
600	1,5980	3	0,0074
625	1,4020	6	0,0078
640	1,2059	7	0,0131
660	0,9363	8	0,0135
680	0,5931	9	0,0172
700	0,2255	10	0,0184
720	0,2255	12	0,0000
740	0,2255	11	0,0000

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XII.

Tabla XLIII. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 10

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	1	
25	5,43	1	0,0095
40	5,2722	1	0,0105
60	5,0355	1	0,0118
80	4,8383	1	0,0099
100	4,6016	3	0,0118
120	4,2071	5	0,0197
140	3,8126	9	0,0197
190	2,8659	11	0,0189
220	1,8402	13	0,0342
240	1,4852	10	0,0178
260	1,0907	9	0,0197
280	0,7357	10	0,0178
300	0,4596	6	0,0138
320	0,144	8	0,0158
340	0,0651	6	0,0039
365	0,0651	3	0
400	0,0651	4	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XIII.

Tabla XLIV. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 11

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	1	
20	5,4384	1	0,0114
40	5,21	0	0,0114
70	4,8904	0	0,0107
105	4,7534	1	0,0039

Continuación de la tabla XLIV.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
120	4,6621	2	0,0061
140	4,4795	2	0,0091
160	4,2968	0	0,0091
180	4,1142	0	0,0091
200	3,9315	1	0,0091
220	3,7032	0	0,0114
240	3,5205	0	0,0091
260	3,3836	0	0,0068
300	3,0639	0	0,008
320	2,8813	0	0,0091
340	2,6986	0	0,0091
365	2,5616	0	0,0055
385	2,4247	0	0,0068
405	2,1963	0	0,0114
425	2,0137	0	0,0091
440	1,968	0	0,003
460	1,7854	0	0,0091
480	1,6484	0	0,0068
500	1,4658	0	0,0091
520	1,2831	1	0,0091
540	1,1005	0	0,0091
560	1,0548	0	0,0023
600	0,7808	1	0,0068
625	0,4612	3	0,0128
640	0,3242	3	0,0091
660	0,0502	5	0,0137
680	0,0502	6	0
700	0,0502	8	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XIV.

Tabla XLV. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 12**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	0	
25	5,4419	1	0,009
45	5,1798	1	0,0131
70	4,7678	3	0,0165
80	4,4682	3	0,03
100	4,1311	5	0,0169
120	3,6442	7	0,0243
140	3,2322	10	0,0206
160	2,7079	11	0,0262
180	2,221	13	0,0243
200	1,6966	13	0,0262
220	1,1723	13	0,0262
240	0,7228	10	0,0225
260	0,236	11	0,0243
280	0,236	9	0
300	0,236	9	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XV.

Tabla XLVI. **Datos calculados de prueba de secado solar, repetición 13**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,5666	2	0,005
40	5,4264	4	0,007
70	5,1261	4	0,01
85	4,966	2	0,0107
100	4,8058	2	0,0107
130	4,5856	2	0,0073

Continuación de la tabla XLVI.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
195	4,1652	0	0,0065
210	4,0851	0	0,0053
225	4,005	0	0,0053
245	3,8849	0	0,006
265	3,7848	0	0,005
285	3,6647	0	0,006
305	3,5646	0	0,005
325	3,4244	0	0,007
355	3,2643	0	0,0053
370	3,1842	1	0,0053
400	3,024	0	0,0053
435	2,8238	1	0,0057
455	2,7037	2	0,006
470	2,6236	3	0,0053
500	2,4434	2	0,006
525	2,3033	3	0,0056
545	2,1832	2	0,006
580	2,043	2	0,004
600	1,983	1	0,003
630	1,8428	3	0,0047
650	1,7027	3	0,007
665	1,6226	3	0,0053
680	1,4825	5	0,0093
705	1,2422	8	0,0096
730	0,9219	10	0,0128
745	0,6817	8	0,016
760	0,5215	7	0,0107
780	0,2813	10	0,012
805	0,001	10	0,0112
820	0,001	6	0
840	0,001	3	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XVI.

Tabla XLVII. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición

14

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	3	
20	5,4925	2	0,0087
40	5,3682	3	0,0062
60	5,2189	5	0,0075
85	5,0199	4	0,008
100	4,8458	4	0,0116
120	4,6468	4	0,01
140	4,4726	4	0,0087
160	4,2736	7	0,01
180	4,0249	9	0,0124
200	3,8756	10	0,0075
220	3,4279	8	0,0224
240	3,1542	10	0,0137
260	2,8806	9	0,0137
280	2,5323	5	0,0174
300	2,3582	2	0,0087
320	2,2338	2	0,0062
345	2,0348	1	0,008
360	1,8607	1	0,0116
380	1,6617	2	0,01
400	1,5124	3	0,0075
430	1,3134	3	0,0066
445	1,1642	3	0,01
460	1,0896	3	0,005
480	0,9403	3	0,0075
500	0,8408	4	0,005
520	0,7164	4	0,0062
540	0,6169	4	0,005
560	0,5174	4	0,005
580	0,4179	4	0,005
600	0,2935	4	0,0062
630	0,1194	4	0,0058
645	0,0945	3	0,0017
660	0,0945	3	0
680	0,0945	3	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XVII.

Tabla XLVIII. Datos calculados de prueba de secado solar, repetición

15

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	2	
20	5,5065	2	0,008
40	5,3664	1	0,007
60	5,2863	1	0,004
80	5,1662	3	0,006
105	5,006	2	0,0064
120	4,8458	4	0,0107
140	4,6456	6	0,01
160	4,4454	8	0,01
180	4,0651	9	0,019
200	3,8649	9	0,01
220	3,6246	8	0,012
240	3,3043	8	0,016
260	3,0641	8	0,012
280	2,8639	7	0,01
300	2,6036	7	0,013
325	2,3233	7	0,0112
340	2,1031	6	0,0147
360	1,8228	6	0,014
380	1,5826	7	0,012
400	1,3223	9	0,013
420	1,042	7	0,014
440	0,8418	7	0,01
460	0,7017	3	0,007
480	0,5616	5	0,007
505	0,4414	2	0,0048
520	0,3614	2	0,0053
540	0,2813	2	0,004
560	0,1812	2	0,005
580	0,0811	1	0,005
600	0,021	1	0,003
620	0,021	0	0
640	0,021	1	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XVIII.

Tabla XLIX. Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición

1

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	4	
20	5,5806	7	0,0043
40	5,3656	11	0,0108
65	5,2151	7	0,006
80	5,086	11	0,0086
100	4,871	12	0,0108
120	4,6344	14	0,0118
145	4,1183	19	0,0206
160	3,8172	25	0,0201
180	3,3226	25	0,0247
205	2,8065	21	0,0206
220	2,5484	20	0,0172
240	2,2258	19	0,0161
260	1,8817	18	0,0172
280	1,6882	19	0,0097
300	1,3441	21	0,0172
320	0,9785	22	0,0183
340	0,6989	22	0,014
360	0,4624	17	0,0118
380	0,2258	16	0,0118
410	0,2258	17	0
440	0,2258	15	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XIX.

Tabla L. Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 2

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	3	
20	5,3287	8	0,0169
40	5,0522	8	0,0138
65	4,7143	7	0,0135
85	4,5607	9	0,0077
100	4,3763	8	0,0123
120	4,1613	18	0,0108
140	3,7312	11	0,0215
160	3,424	7	0,0154
180	3,2396	8	0,0092
200	2,9631	10	0,0138
220	2,6866	6	0,0138
240	2,5023	7	0,0092
260	2,2873	11	0,0108
280	1,98	6	0,0154
300	1,8264	5	0,0077
320	1,6728	0	0,0077
340	1,4885	4	0,0092
360	1,3656	6	0,0061
380	1,3041	3	0,0031
400	1,1198	2	0,0092
420	0,9969	17	0,0061
445	0,8433	3	0,0061
465	0,7204	4	0,0061
480	0,6283	3	0,0061
500	0,5054	4	0,0061
520	0,4439	7	0,0031
540	0,3518	6	0,0046
560	0,1982	6	0,0077
580	0,106	7	0,0046
600	0,0445	21	0,0031
620	0,0445	6	0
640	0,0445	6	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XX.

Tabla LI. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 3**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	3	
20	5,3866	11	0,014
40	5,1905	8	0,0098
60	4,9384	5	0,0126
80	4,7703	8	0,0084
100	4,5742	9	0,0098
120	4,3501	7	0,0112
140	4,1261	6	0,0112
160	3,93	7	0,0098
180	3,7619	5	0,0084
205	3,5098	36	0,0101
225	3,3417	29	0,0084
240	3,2017	19	0,0093
265	2,9496	14	0,0101
280	2,8375	32	0,0075
300	2,6415	20	0,0098
320	2,4734	15	0,0084
340	2,2773	16	0,0098
360	2,1092	24	0,0084
380	1,9692	11	0,007
400	1,8011	10	0,0084
420	1,605	10	0,0098
440	1,521	17	0,0042
460	1,2969	14	0,0112
480	1,2129	25	0,0042
500	1,0728	7	0,007
520	0,8487	34	0,0112
540	0,7367	24	0,0056
560	0,5966	6	0,0070
580	0,4286	6	0,0084
600	0,3165	7	0,0056
630	0,1765	7	0,0047
660	0,1765	7	0
680	0,1765	8	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXI.

Tabla LII. Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 4

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Elevación de temperatura (°C)	Velocidad de secado (g/(g <sub>seco</sub> *min))
0	5,6667	22	
20	5,4	16	0,0133
40	5,2286	15	0,0086
60	5,0381	14	0,0095
80	4,8857	10	0,0076
100	4,7714	10	0,0057
120	4,619	9	0,0076
140	4,4667	9	0,0076
160	4,3333	8	0,0067
180	4,181	7	0,0076
200	4,0667	7	0,0057
220	3,8952	4	0,0086
250	3,6667	6	0,0076
260	3,6095	5	0,0057
280	3,4952	6	0,0057
305	3,3048	23	0,0076
320	3,1905	9	0,0076
340	3,0571	7	0,0067
360	2,9048	10	0,0076
390	2,6952	12	0,007
420	2,5238	12	0,0057
440	2,3714	24	0,0076
460	2,2571	22	0,0057
480	2,1619	26	0,0048
500	1,9905	29	0,0086
520	1,8571	32	0,0067
540	1,7238	31	0,0067
560	1,6286	36	0,0048
590	1,4	12	0,0076
620	1,2476	8	0,0051
640	1,1333	8	0,0057
660	1,019	8	0,0057
680	0,9048	8	0,0057
700	0,7905	8	0,0057
720	0,6571	9	0,0067

Continuación de la tabla LII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
740	0,5429	31	0,0057
760	0,4476	31	0,0048
780	0,3524	21	0,0048
800	0,2381	14	0,0057
820	0,1238	9	0,0057
840	0,0286	5	0,0048
860	0,0286	4	0
880	0,0286	5	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXII.

Tabla LIII. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 5**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	1	
20	5,2029	9	0,0232
40	4,913	11	0,0145
70	4,3913	14	0,0174
105	3,8116	17	0,0166
130	3,2609	23	0,022
155	2,8261	19	0,0174
190	1,8406	24	0,0282
205	1,7536	23	0,0058
250	1,1159	16	0,0142
280	0,5362	17	0,0193
300	0,2464	27	0,0145
320	0,0725	21	0,0087
340	0,0725	18	0
360	0,0725	16	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXIII.

Tabla LIV. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 6**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
30	5,2366	4	0,0143
60	4,8781	8	0,0119
80	4,5436	12	0,0167
100	4,1852	11	0,0179
120	3,8268	17	0,0179
140	3,4444	19	0,0191
160	2,9665	21	0,0239
180	2,5364	21	0,0215
200	2,0346	24	0,0251
220	1,5806	22	0,0227
245	1,055	23	0,021
270	0,5771	23	0,0191
300	0,0992	17	0,0159
320	0,0992	16	0
340	0,0992	17	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXIV.

Tabla LV. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 7**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,3366	4	0,0165
40	4,9076	6	0,0215
60	4,5776	14	0,0165
80	4,1155	17	0,0231
100	3,6865	15	0,0215
120	3,2574	9	0,0215

Continuación de la tabla LV.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
140	2,9274	9	0,0165
160	2,5314	14	0,0198
180	2,1683	10	0,0182
205	1,8053	7	0,0145
225	1,3432	16	0,0231
240	1,0792	13	0,0176
260	0,8482	11	0,0116
280	0,4851	7	0,0182
305	0,2541	13	0,0092
320	0,0561	13	0,0132
340	0,0561	12	0
360	0,0561	18	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXV.

Tabla LVI. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 8**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,4966	9	0,0085
55	4,9524	14	0,0155
90	4,3741	7	0,0165
125	3,6599	35	0,0204
140	3,2857	8	0,0249
160	2,9456	12	0,017
180	2,5374	17	0,0204
200	2,0272	16	0,0255
220	1,6531	22	0,0187

Continuación de la tabla LVI.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
240	1,1429	15	0,0255
260	0,8707	5	0,0136
285	0,4286	15	0,0177
300	0,2585	17	0,0113
320	0,2585	14	0
340	0,2585	33	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXVI.

Tabla LVII. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición 9**

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,5613	10	0,0053
40	5,2714	13	0,0145
60	5,0343	12	0,0119
80	4,7708	31	0,0132
105	4,4282	11	0,0137
120	4,2701	16	0,0105
140	3,9275	20	0,0171
160	3,664	27	0,0132
180	3,3742	20	0,0145
200	3,0843	13	0,0145
220	2,8472	9	0,0119
240	2,5837	16	0,0132
260	2,2938	8	0,0145
280	2,083	17	0,0105
300	1,8195	7	0,0132

Continuación de la tabla LVII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
320	1,6087	14	0,0105
340	1,3979	10	0,0105
360	1,2134	7	0,0092
380	0,9763	16	0,0119
400	0,7655	7	0,0105
470	0,1331	23	0,009
525	0,1331	8	0
545	0,1331	28	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXVII.

Tabla LVIII. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

10

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,5338	5	0,0066
40	5,2237	11	0,0155
60	5,0022	9	0,0111
80	4,7143	16	0,0144
100	4,3599	14	0,0177
120	3,9834	14	0,0188
140	3,6955	15	0,0144
160	3,4297	15	0,0133
185	3,0753	14	0,0142
200	2,8095	14	0,0177
220	2,588	15	0,0111
240	2,2558	18	0,0166
260	1,8128	22	0,0221

Continuación de la tabla LVIII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
285	1,4363	18	0,0151
300	1,2148	10	0,0148
325	0,9269	13	0,0115
340	0,7054	11	0,0148
360	0,4618	21	0,0122
380	0,2846	11	0,0089
400	0,041	7	0,0122
440	0,041	12	0
460	0,041	15	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXVIII.

Tabla LIX. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

11

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	2	
20	5,2659	11	0,02
50	4,7923	11	0,0158
85	4,2095	15	0,0167
100	3,8452	19	0,0243
120	3,4444	25	0,02
145	2,8616	25	0,0233
170	2,388	22	0,0189
180	2,0237	22	0,0364
205	1,5137	21	0,0204
225	1,0036	21	0,0255
260	0,3115	20	0,0198
280	0,0565	14	0,0128
305	0,0565	6	0
330	0,0565	7	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXIX.

Tabla LX. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

12

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	1	
20	5,2277	8	0,0219
45	4,7339	26	0,0198
60	4,3772	16	0,0238
85	3,8834	15	0,0198
100	3,4719	17	0,0274
120	2,9506	19	0,0261
140	2,5117	18	0,0219
160	2,1824	28	0,0165
180	1,6612	24	0,0261
200	1,1674	23	0,0247
220	0,7558	23	0,0206
240	0,2346	24	0,0261
265	0,2346	23	0
290	0,2346	21	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXX.

Tabla LXI. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

13

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	3	
20	5,4266	15	0,012
40	5,1311	18	0,0148
60	4,9464	14	0,0092
80	4,5956	13	0,0175
100	4,337	13	0,0129
120	4,0416	15	0,0148
140	3,6537	15	0,0194

Continuación de la tabla LXI.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
155	3,4506	18	0,0135
180	2,8781	22	0,0229
200	2,4534	22	0,0212
220	2,0471	23	0,0203
240	1,6223	23	0,0212
260	1,1976	22	0,0212
280	0,8837	23	0,0157
300	0,5328	22	0,0175
320	0,2927	22	0,012
340	0,0157	22	0,0139
360	0,0157	19	0
380	0,0157	19	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXXI.

Tabla LXII. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

14

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	3	
20	5,4048	18	0,0131
40	5,1905	26	0,0107
65	4,881	9	0,0124
80	4,6667	13	0,0143
100	4,2857	10	0,019
125	4,0238	9	0,0105
140	3,6667	13	0,0238
165	3,1667	15	0,02
195	2,5238	18	0,0214

Continuación de la tabla LXII.

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
245	1,2619	23	0,0252
260	0,8095	23	0,0302
280	0,4286	23	0,019
310	0,4286	23	0
325	0,4286	32	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXXII.

Tabla LXIII. **Datos calculados de prueba de secado híbrido, repetición**

15

<b>Tiempo de secado (min)</b>	<b>Contenido de humedad (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>	<b>Elevación de temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de secado (g/(g<sub>seco</sub>*min))</b>
0	5,6667	1	
20	5,3596	8	0,0154
40	5,0965	9	0,0132
65	4,7895	8	0,0123
85	4,4386	14	0,0175
105	4,0658	14	0,0186
120	3,7368	18	0,0219
140	3,2325	22	0,0252
160	2,75	23	0,0241
180	2,2456	23	0,0252
200	1,6754	23	0,0285
220	1,3246	23	0,0175
240	0,7544	23	0,0285
260	0,2939	24	0,023
280	0,2939	24	0
300	0,2939	24	0

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de información, de la tabla XXXIII.

Los datos se ordenaron y se promediaron según el método de secado para trazar curvas de secado representativas de cada método, según se detalla en las siguientes tablas:

Tabla LXIV. **Contenido de humedad en función del tiempo de secado solar**

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,6667	0,0000
20	5,5	5,4	5,5	5,5	5,6	5,5	5,5	5,7	5,6	5,5	5,4	5,5	5,6	5,5	5,5	5,5149	0,0622
40	5,4	5,3	5,3	5,5	5,5	5,4	5,4	5,6	5,5	5,3	5,2	5,2	5,4	5,4	5,4	5,3729	0,1001
60	5,3	5,1	5,1	5,4	5,4	5,1	5,3	5,4	5,3	5,0	5,0	4,9	5,2	5,2	5,3	5,2048	0,1534
80	5,2	4,9	5,0	5,3	5,4	4,9	5,1	5,2	5,1	4,8	4,9	4,5	5,0	5,1	5,2	5,0279	0,2271
100	5,0	4,7	4,8	5,2	5,3	4,6	4,9	5,1	4,9	4,6	4,8	4,1	4,8	4,8	5,0	4,8534	0,2852
120	4,9	4,6	4,6	5,1	5,2	4,3	4,8	4,9	4,8	4,2	4,7	3,6	4,7	4,6	4,8	4,6569	0,3890
140	4,8	4,3	4,5	5,1	5,1	3,9	4,5	4,7	4,6	3,8	4,5	3,2	4,5	4,5	4,6	4,4445	0,4801
160	4,7	4,0	4,3	5,0	5,1	3,6	4,3	4,4	4,5	3,4	4,3	2,7	4,4	4,3	4,4	4,2257	0,5970
180	4,6	3,6	4,2	4,9	5,0	3,3	4,1	4,1	4,3	3,1	4,1	2,2	4,3	4,0	4,1	3,9925	0,7060
200	4,4	3,4	4,0	4,8	4,9	3,0	3,9	3,8	4,1	2,5	3,9	1,7	4,1	3,9	3,9	3,7559	0,8345
220	4,3	3,3	3,9	4,7	4,8	2,6	3,7	3,5	3,8	1,8	3,7	1,2	4,0	3,4	3,6	3,4968	0,9799
240	4,0	2,9	3,7	4,6	4,7	2,3	3,6	3,3	3,6	1,5	3,5	0,7	3,9	3,2	3,3	3,2532	1,0735
260	3,7	2,8	3,5	4,6	4,6	2,0	3,3	3,1	3,4	1,1	3,4	0,2	3,8	2,9	3,1	3,0286	1,1793
280	3,3	2,5	3,3	4,5	4,6	1,6	3,1	2,9	3,3	0,7	3,2	0,2	3,7	2,5	2,9	2,8308	1,1992
300	3,0	2,2	3,1	4,4	4,5	1,3	2,9	2,7	3,2	0,5	3,1	0,2	3,6	2,4	2,6	2,6419	1,2237
320	2,6	2,0	2,9	4,3	4,4	1,0	2,7	2,5	3,0	0,1	2,9	0,2	3,5	2,2	2,4	2,4517	1,2536
340	2,2	1,7	2,7	4,3	4,4	0,6	2,5	2,3	2,9	0,1	2,7	0,2	3,3	2,1	2,1	2,2797	1,2645
360	2,1	1,6	2,6	4,2	4,3	0,4	2,4	2,1	2,8	0,1	2,6	0,2	3,2	1,9	1,8	2,1474	1,2641
380	1,8	1,3	2,4	4,1	4,2	0,2	2,3	1,9	2,7	0,1	2,5	0,2	3,1	1,7	1,6	2,0114	1,2648
400	1,6	1,2	2,2	4,1	4,1	0,1	2,0	1,8	2,6	0,1	2,3	0,2	3,0	1,5	1,3	1,8794	1,2537
420	1,4	0,8	2,1	4,0	4,0	0,1	1,8	1,6	2,5	0,1	2,1	0,2	2,9	1,4	1,0	1,7337	1,2469
440	1,2	0,4	2,0	3,9	3,9	0,1	1,5	1,4	2,4	0,1	2,0	0,2	2,8	1,2	0,8	1,6012	1,2442
460	1,2	0,3	1,8	3,8	3,9	0,1	1,3	1,2	2,3	0,1	1,8	0,2	2,7	1,1	0,7	1,5024	1,2393
480	1,0	0,3	1,6	3,7	3,8	0,1	1,2	0,9	2,2	0,1	1,6	0,2	2,6	0,9	0,6	1,3952	1,2220
500	1,0	0,3	1,5	3,7	3,7	0,1	1,0	0,7	2,1	0,1	1,5	0,2	2,4	0,8	0,5	1,3012	1,1923
520	0,9	0,3	1,3	3,6	3,6	0,1	0,8	0,5	2,0	0,1	1,3	0,2	2,3	0,7	0,4	1,2107	1,1801
540	0,8	0,3	1,2	3,5	3,6	0,1	0,7	0,4	1,9	0,1	1,1	0,2	2,2	0,6	0,3	1,1322	1,1597
560	0,7	0,3	1,1	3,4	3,5	0,1	0,5	0,4	1,8	0,1	1,1	0,2	2,1	0,5	0,2	1,0615	1,1425
580	0,6	0,3	0,9	3,4	3,4	0,1	0,4	0,3	1,7	0,1	0,9	0,2	2,0	0,4	0,1	0,9905	1,1303
600	0,5	0,3	0,8	3,3	3,3	0,1	0,3	0,2	1,6	0,1	0,8	0,2	2,0	0,3	0,0	0,9198	1,1131
620	0,4	0,3	0,7	3,2	3,2	0,1	0,2	0,2	1,4	0,1	0,5	0,2	1,9	0,2	0,0	0,8385	1,0942
640	0,3	0,3	0,5	3,1	3,0	0,1	0,1	0,1	1,2	0,1	0,3	0,2	1,8	0,1	0,0	0,7430	1,0518
660	0,2	0,3	0,3	3,0	3,0	0,1	0,1	0,1	0,9	0,1	0,1	0,2	1,6	0,1	0,0	0,6757	1,0352
680	0,2	0,3	0,2	2,9	2,9	0,1	0,1	0,0	0,6	0,1	0,1	0,2	1,5	0,1	0,0	0,6186	1,0100
700	0,2	0,3	0,1	2,8	2,9	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	1,3	0,1	0,0	0,5682	0,9856

Continuación de la tabla LXIV.

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
720	0,2	0,3	0,1	2,8	2,8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	1,1	0,1	0,0	0,5396	0,9427
740	0,2	0,3	0,1	2,7	2,8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,8	0,1	0,0	0,5140	0,9181
760	0,2	0,3	0,1	2,6	2,6	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5	0,1	0,0	0,4853	0,8823
780	0,2	0,3	0,1	2,5	2,4	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,0	0,4486	0,8297
800	0,2	0,3	0,1	2,5	2,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4177	0,7939
820	0,2	0,3	0,1	2,4	2,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3932	0,7439
840	0,2	0,3	0,1	2,3	1,8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3740	0,6976
860	0,2	0,3	0,1	2,3	1,7	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3658	0,6757
880	0,2	0,3	0,1	2,2	1,6	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3503	0,6372
900	0,2	0,3	0,1	2,1	1,4	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3369	0,6060
920	0,2	0,3	0,1	2,1	1,4	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3280	0,5839
940	0,2	0,3	0,1	2,0	1,3	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3137	0,5490
960	0,2	0,3	0,1	1,9	1,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,3015	0,5213
980	0,2	0,3	0,1	1,8	1,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2879	0,4911
1 000	0,2	0,3	0,1	1,8	0,9	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2756	0,4631
1 020	0,2	0,3	0,1	1,7	0,8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2630	0,4330
1 040	0,2	0,3	0,1	1,6	0,7	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2519	0,4088
1 060	0,2	0,3	0,1	1,5	0,6	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2375	0,3824
1 080	0,2	0,3	0,1	1,4	0,5	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2249	0,3549
1 100	0,2	0,3	0,1	1,4	0,4	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2154	0,3399
1 120	0,2	0,3	0,1	1,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2066	0,3161
1 140	0,2	0,3	0,1	1,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1974	0,2967
1 160	0,2	0,3	0,1	1,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1884	0,2795
1 180	0,2	0,3	0,1	1,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1743	0,2658
1 200	0,2	0,3	0,1	1,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1681	0,2433
1 220	0,2	0,3	0,1	0,9	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1619	0,2211
1 240	0,2	0,3	0,1	0,9	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1589	0,2101
1 260	0,2	0,3	0,1	0,8	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1564	0,2014
1 280	0,2	0,3	0,1	0,7	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1511	0,1833
1 300	0,2	0,3	0,1	0,7	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1481	0,1728
1 320	0,2	0,3	0,1	0,6	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1450	0,1625
1 340	0,2	0,3	0,1	0,6	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1403	0,1476
1 360	0,2	0,3	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1357	0,1335
1 380	0,2	0,3	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1332	0,1263
1 400	0,2	0,3	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1303	0,1182
1 420	0,2	0,3	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1264	0,1085
1 440	0,2	0,3	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1234	0,1017
1 460	0,2	0,3	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1209	0,0969
1 480	0,2	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1156	0,0894
1 500	0,2	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1132	0,0872
1 520	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1079	0,0862

Continuación de la tabla LXIV.

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1 540	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1064	0,0867
1 560	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1064	0,0867
1 580	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1064	0,0867

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas XXXIV-XLVIII.

Tabla LXV. **Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo para el método de secado solar**

Tiempo de secado (min)	Aumento de la temperatura del aire de secado (°C)															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0	3	3	1	1	1	1	0	2	1	1	1	0	2	3	2	1,47	0,99
20	3	3	1	1	2	0	1	1	0	1	1	1	2	2	2	1,39	0,92
40	4	3	1	2	1	1	3	2	3	1	0	1	4	3	1	1,99	1,23
60	5	5	2	2	1	1	3	2	3	1	0	2	4	5	1	2,51	1,66
80	6	7	2	1	1	1	2	2	2	1	0	3	3	4	3	2,58	1,86
100	5	7	2	1	1	2	4	3	1	3	1	5	2	4	2	2,89	1,84
120	4	9	2	1	1	4	7	4	1	5	2	7	2	4	4	3,79	2,39
140	4	17	2	2	2	4	4	7	2	9	2	10	2	4	6	5,11	4,22
160	5	14	1	1	2	4	3	9	2	10	0	11	1	7	8	5,20	4,35
180	6	13	1	1	3	7	4	11	4	11	0	13	0	9	9	6,09	4,60
200	6	13	2	1	3	8	6	7	4	12	1	13	0	10	9	6,31	4,42
220	11	10	3	1	3	7	8	8	4	13	0	13	0	8	8	6,47	4,41
240	13	12	3	1	3	4	4	5	4	10	0	10	0	10	8	5,80	4,35
260	12	13	3	0	1	6	5	4	1	9	0	11	0	9	8	5,51	4,63
280	23	12	3	0	1	7	6	3	0	10	0	9	0	5	7	5,72	6,20
300	24	12	3	0	2	6	7	4	0	6	0	9	0	2	7	5,47	6,30
320	24	14	3	0	2	8	7	5	0	8	0		0	2	7	5,71	6,70
340	19	10	3	0	1	5	8	3	0	6	0		0	1	6	4,43	5,31
360	19	12	4	0	2	4	7	4	0	4	0		0	1	6	4,49	5,37
380	23	15	4	0	1	3	6	3	1	3	0		1	2	7	4,98	6,49
400	23	18	3	1	2	4	6	3	1	4	0		0	3	9	5,42	6,95
420	23	28	2	2	2	5	5	2	1		0		1	3	7	6,19	8,86
440	19	28	2	3	2	3	5	8	1		0		1	3	7	6,30	8,16

Continuación de la tabla LXV.

Tiempo de secado (min)	Aumento de la temperatura del aire de secado (°C)															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
460	11	29	1	2	2		5	13	2		0		2	3	3	6,11	8,23
480	11	29	1	2	3		8	13	3		0		3	3	5	6,68	8,09
500	9	27	1	1	2		8	10	3		0		2	4	3	5,78	7,47
520	8		0	2	3		8	8	2		1		3	4	2	3,69	2,95
540	12		2	1	2		5	6	1		0		2	4	2	3,42	3,39
560	11		1	3	2		4	4	3		0		2	4	2	3,27	2,89
580	8		3	3	2		3	3	3		1		2	4	1	2,95	1,96
600	5		5	1	0		0	3	3		1		1	4	1	2,16	1,79
620	5		4	1	0		2	0	5		3		2	4	0	2,39	2,01
640	10		4	0	0		5	2	7		3		3	3	1	3,41	2,91
660	16		4	0	0		3	2	8		5		3	3		4,32	4,61
680	23		4	2	0			2	9		6		5	3		5,94	6,91
700	23		5	2	0			2	10		8		7			7,09	7,32

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas XXXIV-XLVIII.

Tabla LXVI. **Velocidad de secado en función del tiempo para el método de secado solar**

Tiempo de secado (min)	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
20	8	13	8	7	5	7	8	0	5	9	11	8	5	9	8	7,48	3,07
40	4	7	9	3	4	8	6	5	5	11	11	12	7	6	7	7,08	2,71
60	4	8	9	5	4	15	6	7	7	12	11	15	9	7	4	8,23	3,71
80	5	10	9	4	3	12	7	8	11	10	9	30	10	8	6	9,44	6,19
100	8	8	8	5	3	15	8	8	7	12	5	17	11	12	6	8,88	3,74
120	4	7	8	4	3	15	10	10	9	20	6	24	8	10	11	9,96	5,88
140	8	12	7	3	6	19	14	11	6	20	9	21	7	9	10	10,74	5,28
160	6	17	7	4	2	15	10	14	9	19	9	26	7	10	10	11,04	6,30
180	5	17	8	5	5	17	9	13	7	19	9	24	7	12	19	11,68	6,25
200	9	13	9	3	2	15	11	17	12	24	9	26	6	7	10	11,73	6,74
220	6	6	6	5	5	18	9	14	13	34	11	26	5	22	12	12,95	8,84
240	14	16	11	3	5	18	9	10	12	18	9	22	6	14	16	12,18	5,35
260	13	11	11	4	4	15	11	13	10	20	7	24	5	14	12	11,50	5,64

Continuación de la tabla LXVI.

Tiempo de secado (min)	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{x}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
280	19	16	10	3	5	15	9	8	8	18	7	0	6	17	10	9,97	5,82
300	18	13	10	4	2	17	11	12	6	14	8	0	5	9	13	9,44	5,26
320	18	12	8	4	5	18	12	10	6	16	9	0	7	6	12	9,51	5,28
340	19	13	8	5	2	17	8	11	6	4	9	0	6	8	15	8,72	5,39
360	8	8	7	3	5	14	6	9	5	1	6	0	5	12	14	6,92	4,15
380	13	11	8	2	5	11	5	9	5	0	7	0	5	10	12	6,86	4,12
400	9	8	9	3	4	6	8	8	5	0	10	0	5	7	13	6,48	3,66
420	13	29	9	4	3	0	11	6	5	0	10	0	6	7	14	7,82	7,35
440	8	19	4	5	5	0	13	10	6	0	3	0	6	9	10	6,53	5,29
460	0	8	11	2	3	0	10	10	4	0	9	0	6	5	7	5,00	4,01
480	9	0	8	6	3	0	9	14	5	0	7	0	6	7	7	5,42	4,13
500	2	0	7	5	6	0	9	11	6	0	9	0	6	5	5	4,72	3,64
520	4	0	8	3	4	0	10	9	5	0	9	0	6	6	5	4,59	3,49
540	5	0	5	5	3	0	7	5	6	0	9	0	6	5	4	4,01	2,86
560	6	0	7	3	5	0	6	5	5	0	2	0	5	5	5	3,61	2,49
580	5	0	7	3	4	0	6	3	5	0	5	0	4	5	5	3,38	2,30
600	4	0	5	5	5	0	6	3	7	0	7	0	3	6	3	3,57	2,59
620	6	0	8	3	5	0	6	2	8	0	12	0	4	6	0	3,95	3,62
640	6	0	10	3	12	0	6	2	13	0	9	0	6	3	0	4,74	4,63
660	4	0	7	5	5	0	0	1	13	0	14	0	6	0	0	3,64	4,76
680	0	0	7	5	1	0	0	4	17	0	0	0	9	0	0	2,91	4,98
700	0	0	6	5	2	0	0	0	18	0	0	0	10	0	0	2,68	5,22
720	0	0	4	5	5	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	1,64	3,28
740	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	1,39	3,85
760	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	1,35	3,11
780	0	0	0	5	11	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	1,84	4,09
800	0	0	0	3	8	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	1,56	3,56
820	0	0	0	3	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,04	3,19
840	0	0	0	3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,96	2,89
860	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,41	1,10
880	0	0	0	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,79	2,15
900	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	1,99
920	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	1,19
940	0	0	0	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,71	1,90
960	0	0	0	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64	1,76
980	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67	1,86
1 000	0	0	0	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,58	1,54
1 020	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,63	1,67
1 040	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	1,49
1 060	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,72	2,02
1 080	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,63	1,67

Continuación de la tabla LXVI.

Tiempo de secado (min)	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1 100	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,48	1,35
1 120	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,48	1,32
1 140	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	1,26
1 160	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	1,19
1 180	0	0	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,71	2,01
1 200	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	1,20
1 220	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	1,20
1 240	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,60
1 260	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,50
1 280	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	1,20
1 300	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,60
1 320	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,60
1 340	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,23	0,90
1 360	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,23	0,90
1 380	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,56
1 400	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,57
1 420	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,21	0,80
1 440	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,60
1 460	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,50
1 480	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	1,20
1 500	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16	0,62
1 520	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	1,20
1 540	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,30
1 560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
1 580	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas XXXIV-XLVIII.

Tabla LXVII. **Velocidad de secado en función del contenido de humedad para el método de secado solar**

Contenido de humedad (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>seco</sub> )	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5,51	9	18	8	6	4	7	8	6	5	9	11	8	6	9	8	8,14	3,23
5,37	4	12	9	5	3	8	6	7	6	10	11	10	8	6	7	7,52	2,54
5,18	6	8	9	4	4	13	6	8	9	11	11	13	9	8	6	8,41	2,79
4,97	5	9	24	4	5	13	8	9	8	11	11	15	11	9	7	9,97	4,82
4,81	8	9	24	3	5	11	9	10	8	10	7	15	11	11	11	10,14	4,69
4,65	5	8	12	3	4	14	11	11	6	11	6	37	8	10	10	10,55	7,96
4,47	7	9	7	3	3	15	13	13	8	14	9	30	7	9	10	10,58	6,38
4,26	7	13	7	5	5	16	9	14	9	19	9	22	7	10	14	10,89	5,11
4,02	13	16	9	4	3	18	10	14	12	20	9	18	5	12	17	12,08	5,28
3,84	13	17	7	1	3	18	10	17	13	20	10	21	6	9	10	11,65	6,07
3,63	15	17	11	4	3	15	9	15	13	20	11	24	6	16	12	12,60	5,72
3,41	18	14	10	3	4	16	11	11	10	19	7	22	7	22	15	12,64	6,09
3,23	19	7	10	4	5	16	11	11	7	19	7	21	5	16	15	11,59	5,69
2,98	18	15	9	5	12	15	10	9	6	19	9	23	5	14	11	12,03	5,43
2,76	18	10	8	5	2	17	12	11	5	21	9	26	6	15	11	11,71	6,54
2,60	18	12	7	4	7	18	11	11	5	23	7	26	5	17	13	12,25	6,81
2,33	19	16	9	3	10	18	5	11	4	27	9	25	6	8	11	12,09	7,32
2,17	16	13	9	5	10	17	7	9	5	29	11	25	6	7	14	12,10	7,15
1,97	10	12	5	5	12	15	9	9	5	32	3	25	3	9	14	11,30	8,18
1,74	12	13	10	4	2	15	12	8	5	30	8	26	6	11	13	11,69	7,52
1,59	10	10	8	3	7	16	13	7	7	23	8	26	6	9	12	11,02	6,25
1,36	13	11	8	3	4	17	10	11	9	18	9	26	9	7	13	11,20	5,82
1,19	0	8	5	4	6	17	9	10	13	19	9	26	10	9	13	10,68	6,54
0,97	2	18	7	5	7	18	9	13	13	19	4	25	12	7	13	11,46	6,52
0,81	5	28	4	2	5	17	10	12	15	18	6	23	14	5	9	11,61	7,75
0,64	5	24	10	2	6	17	7	10	17	16	9	23	15	5	7	11,52	6,68
0,46	4	20	9	2	5	15	6	6	18	14	13	23	11	5	5	10,44	6,48
0,32	6	12	7	2	3	13	6	4	18	15	9	24	12	6	5	9,42	6,10
0,20	6	0	7	5	3	11	5	3	0	15	11	0	12	6	5	5,92	4,64
0,06	0	0	0	0	7	0	8	3	0	0	13	0	11	0	4	3,14	4,65

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XXXIV-XLVIII.

Tabla LXVIII. **Contenido de humedad en función del tiempo de secado híbrido**

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,6667	0,0000
20	5,6	5,3	5,4	5,4	5,2	5,4	5,3	5,5	5,6	5,5	5,3	5,2	5,4	5,4	5,4	5,3928	0,1145
40	5,4	5,1	5,2	5,2	4,9	5,1	4,9	5,2	5,3	5,2	5,0	4,8	5,1	5,2	5,1	5,1104	0,1520
60	5,2	4,8	4,9	5,0	4,6	4,9	4,6	4,9	5,0	5,0	4,6	4,4	4,9	4,9	4,9	4,8449	0,2250
80	5,1	4,6	4,8	4,9	4,2	4,5	4,1	4,5	4,8	4,7	4,3	4,0	4,6	4,7	4,5	4,5543	0,2959
100	4,9	4,4	4,6	4,8	3,9	4,2	3,7	4,2	4,5	4,4	3,8	3,5	4,3	4,3	4,2	4,2323	0,3862
120	4,6	4,2	4,4	4,6	3,5	3,8	3,3	3,8	4,3	4,0	3,4	3,0	4,0	4,1	3,7	3,9064	0,4833
140	4,2	3,7	4,1	4,5	3,1	3,4	2,9	3,3	3,9	3,7	3,0	2,5	3,7	3,7	3,2	3,5304	0,5363
160	3,8	3,4	3,9	4,3	2,7	3,0	2,5	2,9	3,7	3,4	2,6	2,2	3,3	3,3	2,8	3,1893	0,5973
180	3,3	3,2	3,8	4,2	2,1	2,5	2,2	2,5	3,4	3,1	2,0	1,7	2,9	2,8	2,2	2,8029	0,7051
200	2,9	3,0	3,6	4,1	1,8	2,0	1,9	2,0	3,1	2,8	1,6	1,2	2,5	2,4	1,7	2,4284	0,7979
220	2,5	2,7	3,4	3,9	1,5	1,6	1,5	1,7	2,8	2,6	1,1	0,8	2,0	1,9	1,3	2,0889	0,8782
240	2,2	2,5	3,2	3,7	1,3	1,2	1,1	1,1	2,6	2,3	0,7	0,2	1,6	1,4	0,8	1,7239	0,9908
260	1,9	2,3	3,0	3,6	0,9	0,8	0,8	0,9	2,3	1,8	0,3	0,2	1,2	0,8	0,3	1,4095	1,0281
280	1,7	2,0	2,8	3,5	0,5	0,4	0,5	0,5	2,1	1,5	0,1	0,2	0,9	0,4	0,3	1,1633	1,0501
300	1,3	1,8	2,6	3,3	0,2	0,1	0,3	0,3	1,8	1,2	0,1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,9760	1,0223
320	1,0	1,7	2,5	3,2	0,1	0,1	0,1	0,3	1,6	1,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,8467	0,9767
340	0,7	1,5	2,3	3,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1,4	0,7	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,7427	0,9191
360	0,5	1,4	2,1	2,9	0,1	0,1	0,1	0,3	1,2	0,5	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,6688	0,8600
380	0,2	1,3	2,0	2,8	0,1	0,1	0,1	0,3	1,0	0,3	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,6027	0,8139
400	0,2	1,1	1,8	2,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,8	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,5404	0,7620
420	0,2	1,0	1,6	2,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,4995	0,7074
440	0,2	0,9	1,5	2,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,4635	0,6605
460	0,2	0,8	1,3	2,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,4207	0,6096
480	0,2	0,6	1,2	2,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,3946	0,5787
500	0,2	0,5	1,1	2,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,3656	0,5242
520	0,2	0,4	0,8	1,9	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,3377	0,4736
540	0,2	0,4	0,7	1,7	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,3152	0,4336
560	0,2	0,2	0,6	1,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2892	0,4032
580	0,2	0,1	0,4	1,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2617	0,3616
600	0,2	0,0	0,3	1,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2417	0,3306
620	0,2	0,0	0,2	1,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2287	0,3056
640	0,2	0,0	0,2	1,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2180	0,2789
660	0,2	0,0	0,2	1,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2104	0,2524
680	0,2	0,0	0,2	0,9	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2027	0,2266
700	0,2	0,0	0,2	0,8	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1951	0,2019
720	0,2	0,0	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1862	0,1750
740	0,2	0,0	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1786	0,1543
760	0,2	0,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1723	0,1395
780	0,2	0,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1659	0,1277
800	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1583	0,1189

Continuación de la tabla LXVIII.

Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
820	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1507	0,1171
840	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1443	0,1211
860	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1443	0,1211
880	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,4	0,3	0,1443	0,1211

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XLIX-LXIII.

Tabla LXIX. **Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo para el método de secado híbrido**

Tiempo de secado (min)	Aumento de la temperatura del aire de secado (°C)															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0	4	3	3	22	1	2	2	2	2	2	2	1	3	3	1	3,53	5,18
20	7	8	11	16	9	3	4	9	10	5	11	8	15	18	8	9,49	4,24
40	11	8	8	15	11	5	6	12	13	11	11	22	18	26	9	12,44	5,81
60	8	7	5	14	13	8	14	13	12	9	12	16	14	12	8	11,05	3,23
80	11	9	8	10	15	12	17	9	31	16	14	15	13	13	13	13,70	5,53
100	12	8	9	10	17	11	15	15	15	14	19	17	13	10	14	13,24	3,18
120	14	18	7	9	21	17	9	31	16	14	25	19	15	9	18	16,12	6,43
140	18	11	6	9	21	19	9	8	20	15	25	18	15	13	22	15,29	5,79
160	25	7	7	8	20	21	14	12	27	15	23	28	19	15	23	17,55	7,10
180	25	8	5	7	23	21	10	17	20	14	22	24	22	17	23	17,15	6,74
200	22	10	30	7	23	24	8	16	13	14	21	23	22	19	23	18,28	6,72
220	20	6	31	4	21	22	14	22	9	15	21	23	23	21	23	18,24	7,29
240	19	7	19	5	18	23	13	15	16	18	21	24	23	23	23	17,72	5,71
260	18	11	15	5	16	23	11	5	8	22	20	23	22	23	24	16,44	6,87
280	19	6	32	6	17	21	7	13	17	19	14	22	23	23	24	17,51	7,35
300	21	5	20	20	27	17	12	17	7	10	8		22	23	24	16,57	7,06
320	22	0	15	9	21	16	13	14	14	12	7		22	29		14,92	7,50
340	22	4	16	7	18	17	12	33	10	11			22			15,64	8,16
360	17	6	24	10	16		18		7	21			19			15,33	6,28

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XLIX-LXIII.

Tabla LXX. **Velocidad de secado en función del tiempo para el método de secado híbrido**

Tiempo de secado (min)	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
20	4	17	14	13	23	15	17	9	5	7	20	22	12	13	15	13,75	5,74
40	11	14	10	9	14	14	21	13	14	16	17	20	15	11	13	14,07	3,58
60	7	14	13	10	16	12	17	16	12	11	16	24	9	12	12	13,31	4,01
80	9	9	8	8	17	17	23	16	13	14	17	21	18	14	16	14,65	4,56
100	11	12	10	6	17	18	21	18	14	18	24	27	13	19	18	16,37	5,68
120	12	11	11	8	20	18	21	20	11	19	20	26	15	12	22	16,32	5,39
140	19	22	11	8	20	19	17	25	17	14	23	22	19	24	25	18,97	4,99
160	20	15	10	7	19	24	20	17	13	13	21	16	15	21	24	17,03	4,92
180	25	9	8	8	25	22	18	20	14	14	36	26	23	21	25	19,66	7,86
200	21	14	10	6	13	25	15	26	14	18	24	25	21	22	29	18,79	6,55
220	17	14	9	9	9	23	21	19	12	11	24	21	20	23	18	16,55	5,64
240	16	9	9	8	12	21	18	26	13	17	23	26	21	25	29	18,19	6,76
260	17	11	10	6	16	20	12	14	14	22	20	5	21	30	23	16,04	6,87
280	10	15	7	6	19	18	18	17	11	16	13	0	16	19	0	12,34	6,55
300	17	8	10	7	14	16	11	11	13	15	0	0	18	6	0	9,77	6,13
320	18	8	8	8	9	0	13	0	11	12	0	0	12	0	0	6,57	6,13
340	14	9	10	7	0	0	0	0	11	15	0	0	14	0	0	5,25	6,14
360	12	6	8	8	0	0	0	0	9	12	0	0	0	0	0	3,69	4,89
380	12	3	7	7	0	0	0	0	12	9	0	0	0	0	0	3,32	4,66
400	4	9	8	7	0	0	0	0	11	12	0	0	0	0	0	3,39	4,64
420	0	6	10	6	0	0	0	0	10	6	0	0	0	0	0	2,52	3,88
440	0	6	4	8	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	1,84	3,34
460	0	6	11	6	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	2,15	3,89
480	0	6	4	5	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	1,50	2,66
500	0	6	7	9	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1,72	3,08
520	0	3	11	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1,45	3,26
540	0	5	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,13	2,36
560	0	8	7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,30	2,75
580	0	5	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,31	2,81
600	0	3	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,03	2,25
620	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67	1,77
640	0	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59	1,63
660	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48
680	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48
700	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48
720	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44	1,72
740	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48
760	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32	1,23
780	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32	1,23
800	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48
820	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	1,48

Continuación de la tabla LXX.

Tiempo de secado (min)	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
840	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32	1,23
860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
880	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XLIX-LXIII.

Tabla LXXI. **Velocidad de secado en función del contenido de humedad para el método de secado híbrido**

Contenido de humedad (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>seco</sub> )	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))															$\bar{X}$	$\pm\sigma$
	Repetición																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5,39	10	18	14	13	29	15	16	10	11	11	21	23	12	13	16	15,39	5,28
5,10	8	14	11	9	20	13	19	14	13	13	19	21	14	11	13	14,18	3,91
4,79	11	14	9	6	15	13	20	16	13	14	16	20	13	13	12	13,62	3,57
4,44	15	11	11	7	17	17	18	16	14	17	16	23	15	17	18	15,50	3,76
4,13	21	12	11	7	17	18	23	18	13	18	18	22	14	14	18	16,28	4,39
3,76	21	21	8	8	17	18	22	20	15	15	23	22	18	20	22	18,00	4,68
3,44	24	16	9	6	20	19	21	23	14	13	20	27	14	22	24	18,22	5,91
3,08	23	12	10	7	20	23	19	20	14	14	22	26	20	20	25	18,31	5,69
2,75	20	14	9	7	18	23	18	19	12	16	22	24	22	21	24	17,94	5,41
2,39	17	10	9	7	22	23	19	22	14	14	19	20	21	22	25	17,60	5,45
2,03	17	15	8	8	26	25	17	26	11	19	36	19	20	23	26	19,74	7,75
1,68	10	8	9	6	7	23	17	19	11	20	25	26	21	24	29	16,96	7,83
1,34	17	5	10	7	11	22	23	23	10	15	22	25	21	25	18	16,92	6,90
1,08	18	8	7	6	14	21	18	23	11	13	25	24	19	27	22	17,04	6,88
0,79	15	6	8	6	17	20	13	14	11	14	24	21	16	30	28	16,13	7,25
0,49	12	5	8	5	18	19	18	17	10	12	21	23	16	21	25	15,46	6,39
0,25	12	7	5	6	15	17	9	0	9	9	18	26	12	0	0	9,66	7,33
0,03	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	1,24	3,68

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XLIX-LXIII.

El mínimo valor de contenido de humedad común a todas las pruebas de secado es de 0,4286 kg/kg<sub>seco</sub>. De todas las pruebas de secado, se determinó el tiempo en el cual se llegó a este contenido de humedad común, y este tiempo es el que se utilizó para realizar el análisis de varianza, estos tiempos de secado se ordenaron en las tablas LXXII y LXIII.

Tabla LXXII. **Tiempos de secado hasta 0,4286kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad para las pruebas de secado solar**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo de secado (h)</b>
1	10,190
2	7,364
3	10,778
4	23,298
5	18,089
6	5,925
7	9,624
8	9,048
9	11,483
10	5,033
11	10,476
12	4,201
13	12,796
14	9,631
15	8,457
<b>Media</b>	10,426
<b>Desviación estándar</b>	4,898

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XXXIV-XLVIII.

Tabla LXXIII. **Tiempos de secado hasta 0,4286kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad para las pruebas de secado híbrido**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo de secado (h)</b>
1	6,048
2	8,722
3	9,667
4	12,733
5	4,790
6	4,655
7	4,769
8	4,750
9	7,288
10	6,063
11	4,235
12	3,876
13	5,145
14	4,667
15	4,236
<b>Media</b>	6,110
<b>Desviación estándar</b>	2,497

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas XXXIV-XLVIII.

### **3.9. Análisis estadístico**

Con un análisis de varianza se determinó si existe una diferencia significativa entre el tiempo de secado utilizando únicamente energía solar, respecto del tiempo de secado utilizando energía solar y eléctrica (secado híbrido), y se determinó así si alguno de los dos es un método significativamente más efectivo para secar rodajas de durazno (*Prunus persica*), en las condiciones climáticas del municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez.

### 3.9.1. Análisis factorial

De cada tabla de datos de cada prueba de secado se determinó el tiempo en que se llegó a un contenido de humedad final de 0,4286 kg/kg<sub>seco</sub>, el mínimo valor común a todas las pruebas. Cada tiempo de secado es un valor puntual correspondiente a una repetición de un método ( $y_{ij}$ ). Estos datos se ordenaron en la tabla LXXIV.

Tabla LXXIV. **Experimento de un factor para el tiempo de secado de rodajas de durazno (*Prunus persica*) hasta 0,4286kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad en función del método de secado**

Método	Tiempo de secado (h)															$y_i$	$\bar{y}_i$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Solar	10	7	11	23	18	6	10	9	11	5	10	4	13	10	8	156,4	10,4
Híbrido	6	9	10	13	5	5	5	5	7	6	4	4	5	5	4	91,6	6,1
Total																248,0	8,3

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tablas LXXII y LXXIII.

Donde:

$\bar{y}_i$  = Promedio de las observaciones del tiempo de secado del método i.

$y_i$  = Suma de todas las observaciones del tiempo de secado del método i.

### 3.9.2. Análisis de varianza

Con los datos de la tabla LXXII se calcularon las sumas de cuadrados:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$$

Donde:

a = número de métodos.

n = Número de repeticiones de un mismo método.

N = Número total de datos.

SS<sub>E</sub> = Suma de cuadrados debido al error (dentro de los métodos).

SS<sub>Tratamientos</sub> = Suma de cuadrados debido al método (entre métodos).

SS<sub>T</sub> = Suma de cuadrados total.

y<sub>..</sub> = Suma de todas las observaciones del tiempo de secado.

y<sub>ij</sub> = Tiempo de secado del método i, repetición j.

Los grados de libertad:

Grados de libertad para SS<sub>T</sub> = N – 1

Grados de libertad para SS<sub>Tratamientos</sub> = a – 1

Grados de libertad para SS<sub>E</sub> = N – a

Los cuadrados medios:

$$MS_{Tratamientos} = SS_{Tratamientos} / (a - 1)$$

$$MS_E = SS_E / (N - a)$$

Donde:

MS<sub>Tratamientos</sub> = Cuadrado medio debido a los métodos.

MS<sub>E</sub> = Cuadrado medio debido a los errores.

Y la razón de los cuadrados medios para la prueba F:

$$F_0 = MS_{\text{Tratamientos}} / MS_E$$

Este valor, se comparó con el valor de la distribución de Fisher correspondiente a 95 % de confiabilidad ( $\alpha = 0,05$ ), y los grados de libertad calculados, para determinar si se acepta o rechaza la hipótesis nula:

$$F_0 > F_{0,05,a-1,N-a} \rightarrow H_1: \text{existe diferencia significativa.}$$

Los cálculos se resumen en la tabla LXXV.

Tabla LXXV. **Análisis de varianza de un factor para el tiempo de secado de rodajas de durazno (*Prunus persica*) hasta 0,4286 kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad en función del método de secado**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	F <sub>0.05,1,28</sub>
Método	139,7	1	139,7	9,25	4,20
Error	423,1	28	15,1		
Total	562,9	29			

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis factorial, tabla LXXIV.



## 4. RESULTADOS

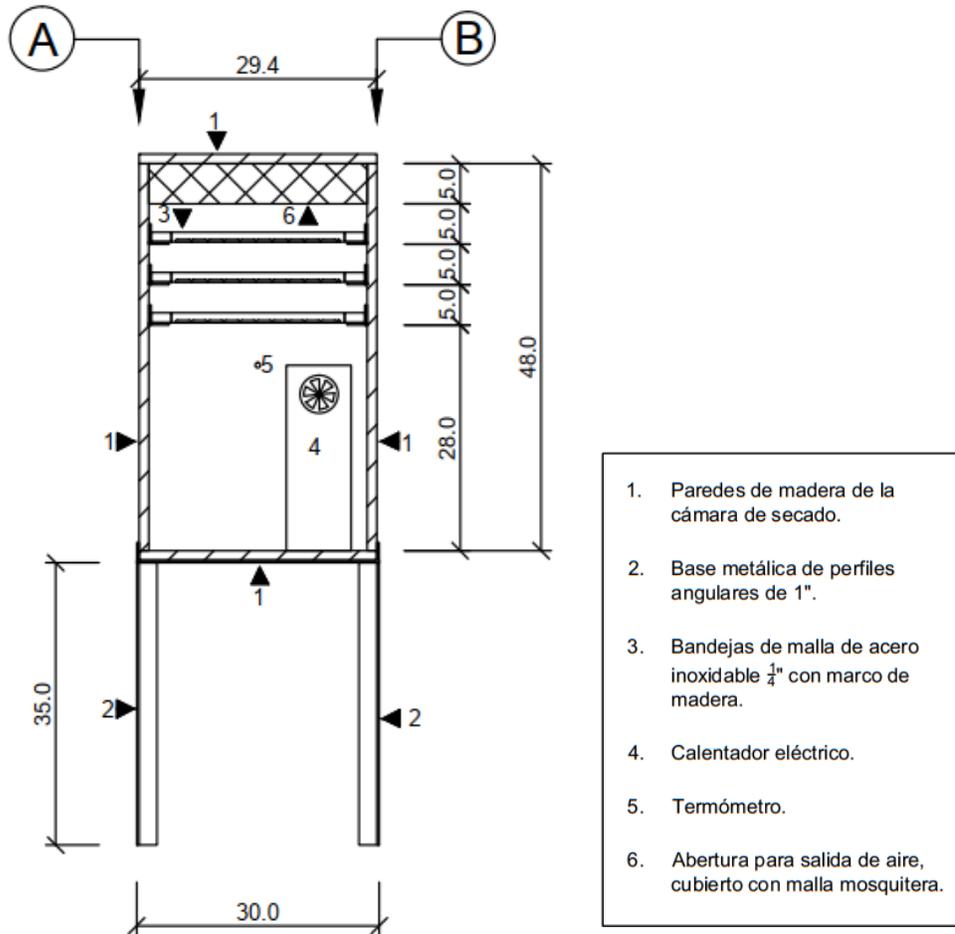
A continuación, se presentan en tablas y gráficas los resultados de las dimensiones del secador solar híbrido experimental obtenidas de los balances de masa, energía y del análisis de transferencia de masa; así como las diferentes curvas de secado que se obtuvieron con las pruebas y los promedios de estas. Las dimensiones de las figuras del diseño del secador están en cm.

Tabla LXXVI. **Áreas de transferencia del secador solar híbrido experimental**

<b>Variable</b>	<b>Magnitud</b>
Demanda de potencia	170,0 W
Área de transferencia de calor del colector solar	0,3548 m <sup>2</sup>
Área de transferencia de masa	0,1116 m <sup>2</sup>
Número de bandejas 30x30 cm	3

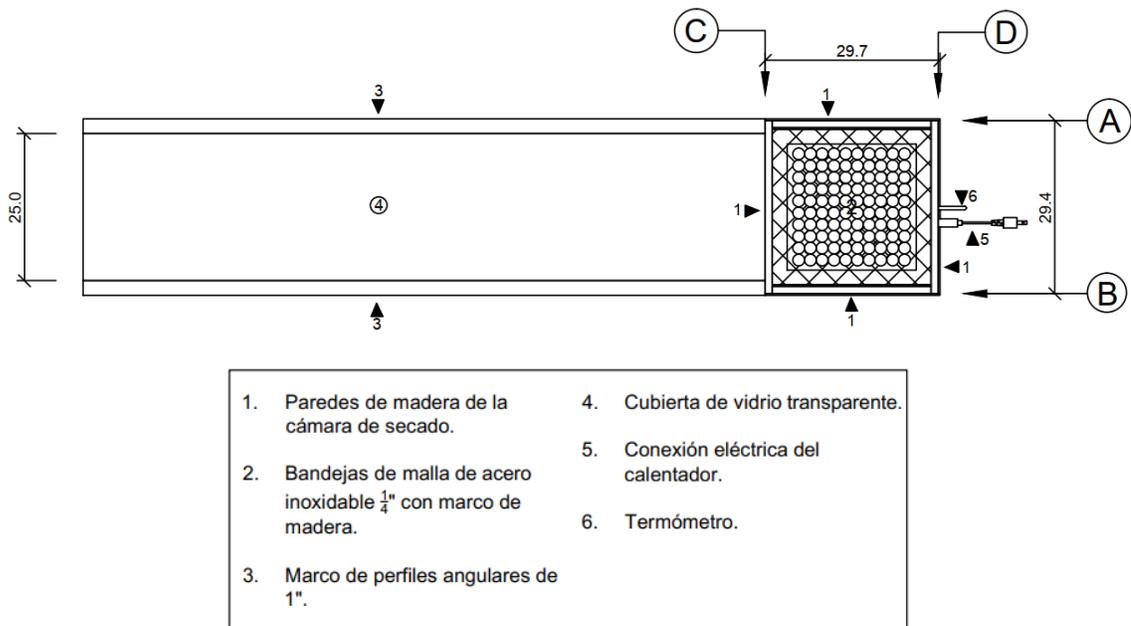
Fuente: elaboración propia, con base en las técnicas cuantitativas de la investigación y tabla III.

Figura 12. **Diseño del secador solar híbrido experimental sección transversal frontal**



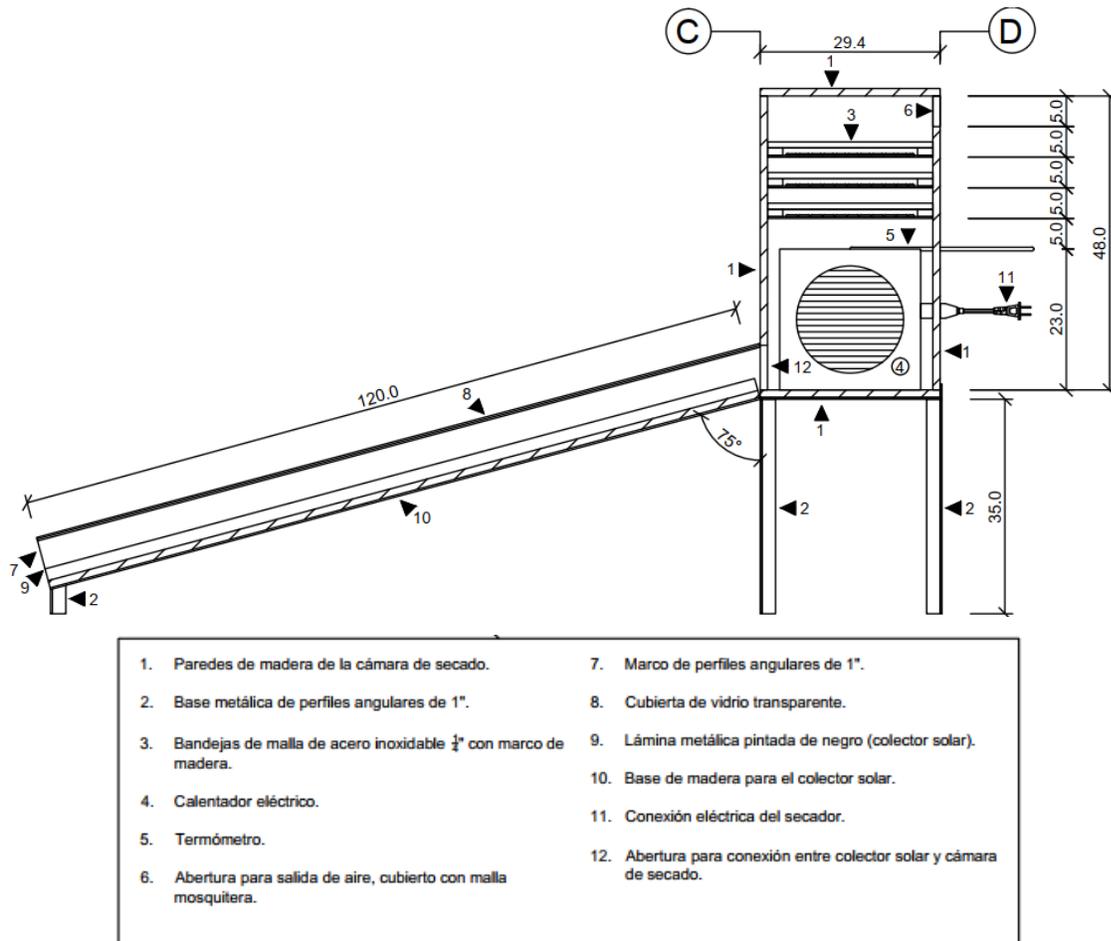
Fuente: elaboración propia, con base en las técnicas cuantitativas de la investigación, empleando AutoCAD 2014.

Figura 13. **Diseño del secador solar híbrido experimental vista de planta**



Fuente: elaboración propia, con base en las técnicas cuantitativas de la investigación, empleando AutoCAD 2014.

Figura 14. **Diseño del secador solar híbrido experimental sección lateral**



Fuente: elaboración propia, con base en las técnicas cuantitativas de la investigación, empleando AutoCAD 2014.

Tabla LXXVII. **Contenido de humedad en función del tiempo de secado**

Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$
0	5,6667	0,0000	5,6667	0,0000
20	5,5149	0,0622	5,3928	0,1145
40	5,3729	0,1001	5,1104	0,1520
60	5,2048	0,1534	4,8449	0,2250
80	5,0279	0,2271	4,5543	0,2959
100	4,8534	0,2852	4,2323	0,3862
120	4,6569	0,3890	3,9064	0,4833
140	4,4445	0,4801	3,5304	0,5363
160	4,2257	0,5970	3,1893	0,5973
180	3,9925	0,7060	2,8029	0,7051
200	3,7559	0,8345	2,4284	0,7979
220	3,4968	0,9799	2,0889	0,8782
240	3,2532	1,0735	1,7239	0,9908
260	3,0286	1,1793	1,4095	1,0281
280	2,8308	1,1992	1,1633	1,0501
300	2,6419	1,2237	0,9760	1,0223
320	2,4517	1,2536	0,8467	0,9767
340	2,2797	1,2645	0,7427	0,9191
360	2,1474	1,2641	0,6688	0,8600
380	2,0114	1,2648	0,6027	0,8139
400	1,8794	1,2537	0,5404	0,7620
420	1,7337	1,2469	0,4995	0,7074
440	1,6012	1,2442	0,4635	0,6605
460	1,5024	1,2393	0,4207	0,6096
480	1,3952	1,2220	0,3946	0,5787
500	1,3012	1,1923	0,3656	0,5242
520	1,2107	1,1801	0,3377	0,4736
540	1,1322	1,1597	0,3152	0,4336
560	1,0615	1,1425	0,2892	0,4032
580	0,9905	1,1303	0,2617	0,3616
600	0,9198	1,1131	0,2417	0,3306
620	0,8385	1,0942	0,2287	0,3056
640	0,7430	1,0518	0,2180	0,2789
660	0,6757	1,0352	0,2104	0,2524

Continuación de la tabla LXXVII.

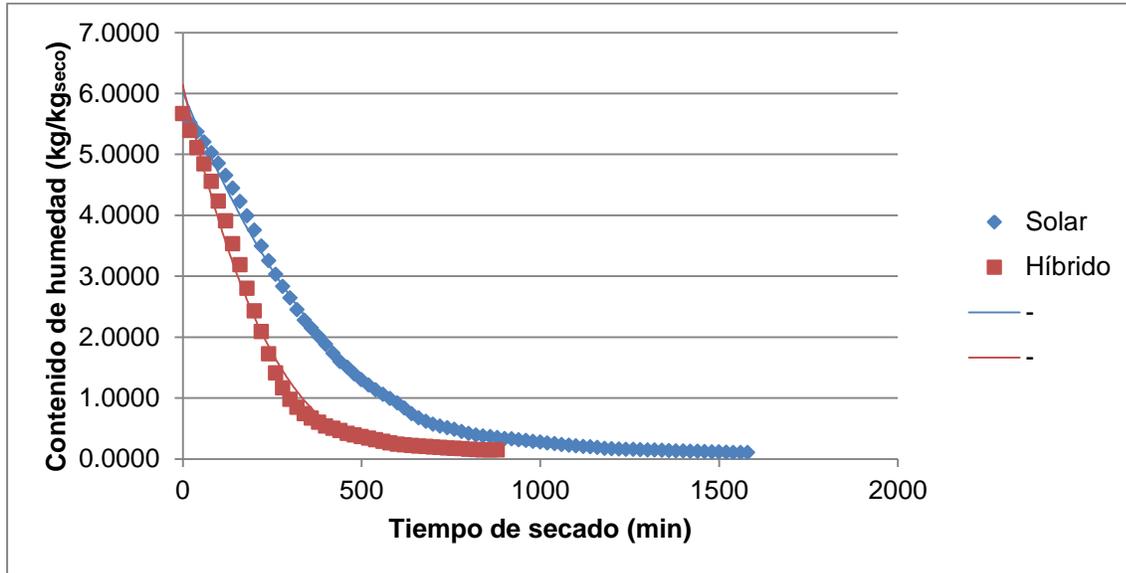
Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$
680	0,6186	1,0100	0,2027	0,2266
700	0,5682	0,9856	0,1951	0,2019
720	0,5396	0,9427	0,1862	0,1750
740	0,5140	0,9181	0,1786	0,1543
760	0,4853	0,8823	0,1723	0,1395
780	0,4486	0,8297	0,1659	0,1277
800	0,4177	0,7939	0,1583	0,1189
820	0,3932	0,7439	0,1507	0,1171
840	0,3740	0,6976	0,1443	0,1211
860	0,3658	0,6757	0,1443	0,1211
880	0,3503	0,6372	0,1443	0,1211
900	0,3369	0,6060		
920	0,3280	0,5839		
940	0,3137	0,5490		
960	0,3015	0,5213		
980	0,2879	0,4911		
1 000	0,2756	0,4631		
1 020	0,2630	0,4330		
1 040	0,2519	0,4088		
1 060	0,2375	0,3824		
1 080	0,2249	0,3549		
1 100	0,2154	0,3399		
1 120	0,2066	0,3161		
1 140	0,1974	0,2967		
1 160	0,1884	0,2795		
1 180	0,1743	0,2658		
1 200	0,1681	0,2433		
1 220	0,1619	0,2211		
1 240	0,1589	0,2101		
1 260	0,1564	0,2014		
1 280	0,1511	0,1833		
1 300	0,1481	0,1728		
1 320	0,1450	0,1625		

Continuación de la tabla LXXVII.

Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	$\pm\sigma$
1 340	0,1403	0,1476		
1 360	0,1357	0,1335		
1 380	0,1332	0,1263		
1 400	0,1303	0,1182		
1 420	0,1264	0,1085		
1 440	0,1234	0,1017		
1 460	0,1209	0,0969		
1 480	0,1156	0,0894		
1 500	0,1132	0,0872		
1 520	0,1079	0,0862		
1 540	0,1064	0,0867		
1 560	0,1064	0,0867		
1 580	0,1064	0,0867		

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas LXIV y LXVIII.

Figura 15. **Contenido de humedad en función del tiempo de secado**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXVII.

Tabla LXXVIII. **Modelo matemático y coeficiente de correlación del contenido de humedad en función del tiempo de secado**

Color	Método	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	Solar	$\omega_p = -3E-09t^3 + 1E-05t^2 - 0,0145t + 6,0289$	0,9972
	Híbrido	$\omega_p = -2E-08t^3 + 4E-05t^2 - 0,0256t + 6,1398$	0,9904

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la figura 15.

Tabla LXXIX. **Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo**

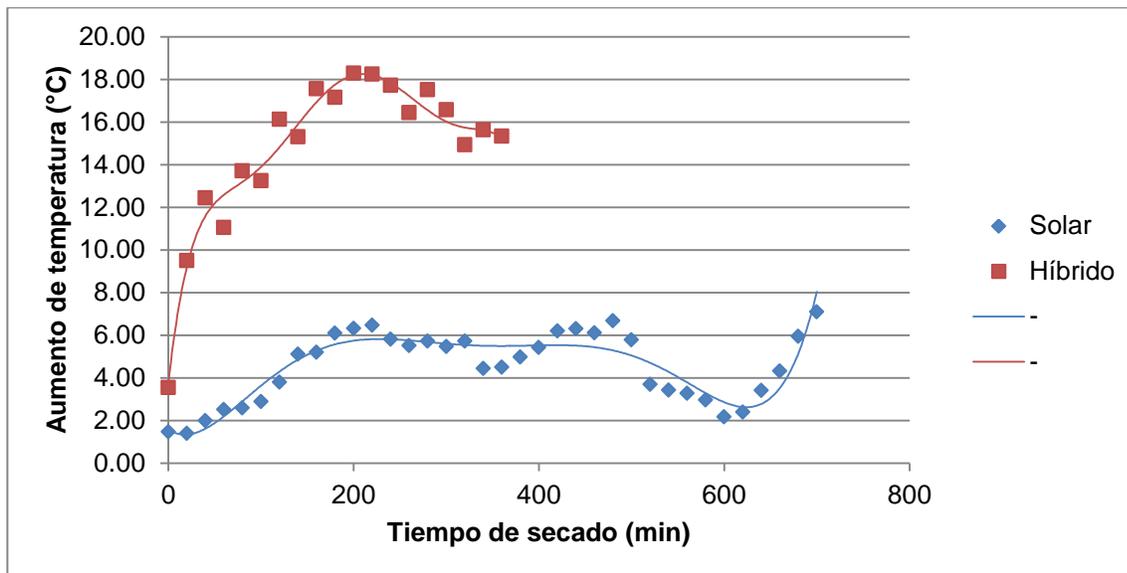
Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Aumento de temperatura (°C)	$\pm\sigma$	Aumento de temperatura (°C)	$\pm\sigma$
0	1,47	0,99	3,53	5,18
20	1,39	0,92	9,49	4,24
40	1,99	1,23	12,44	5,81
60	2,51	1,66	11,05	3,23
80	2,58	1,86	13,70	5,53
100	2,89	1,84	13,24	3,18
120	3,79	2,39	16,12	6,43
140	5,11	4,22	15,29	5,79
160	5,20	4,35	17,55	7,10
180	6,09	4,60	17,15	6,74
200	6,31	4,42	18,28	6,72
220	6,47	4,41	18,24	7,29
240	5,80	4,35	17,72	5,71
260	5,51	4,63	16,44	6,87
280	5,72	6,20	17,51	7,35
300	5,47	6,30	16,57	7,06
320	5,71	6,70	14,92	7,50
340	4,43	5,31	15,64	8,16
360	4,49	5,37	15,33	6,28
380	4,98	6,49		
400	5,42	6,95		
420	6,19	8,86		
440	6,30	8,16		
460	6,11	8,23		
480	6,68	8,09		
500	5,78	7,47		
520	3,69	2,95		
540	3,42	3,39		
560	3,27	2,89		
580	2,95	1,96		
600	2,16	1,79		
620	2,39	2,01		
640	3,41	2,91		
660	4,32	4,61		

Continuación de la tabla LXXIX.

Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Aumento de temperatura (°C)	$\pm\sigma$	Aumento de temperatura (°C)	$\pm\sigma$
680	5,94	6,91		
700	7,09	7,32		

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas LXV y LXIX.

Figura 16. **Aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXIX.

Tabla LXXX. **Modelo matemático y coeficiente de correlación del aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo**

Color	Método	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	Solar	$\Delta T = 1E-14t^6 - 3E-11t^5 + 2E-08t^4 - 7E-06t^3 + 0,001t^2 - 0,0295t + 1,58$	0,8518
	Híbrido	$\Delta T = -5E-13t^6 + 6E-10t^5 - 3E-07t^4 + 6E-05t^3 - 0,007t^2 + 0,3891t + 3,7482$	0,9616

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la figura 16.

Tabla LXXXI. **Velocidad de secado en función del tiempo**

Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	±σ	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	±σ
20	7,48	3,07	13,75	5,74
40	7,08	2,71	14,07	3,58
60	8,23	3,71	13,31	4,01
80	9,44	6,19	14,65	4,56
100	8,88	3,74	16,37	5,68
120	9,96	5,88	16,32	5,39
140	10,74	5,28	18,97	4,99
160	11,04	6,30	17,03	4,92
180	11,68	6,25	19,66	7,86
200	11,73	6,74	18,79	6,55
220	12,95	8,84	16,55	5,64
240	12,18	5,35	18,19	6,76
260	11,50	5,64	16,04	6,87
280	9,97	5,82	12,34	6,55
300	9,44	5,26	9,77	6,13
320	9,51	5,28	6,57	6,13
340	8,72	5,39	5,25	6,14
360	6,92	4,15	3,69	4,89

Continuación de la tabla LXXXI.

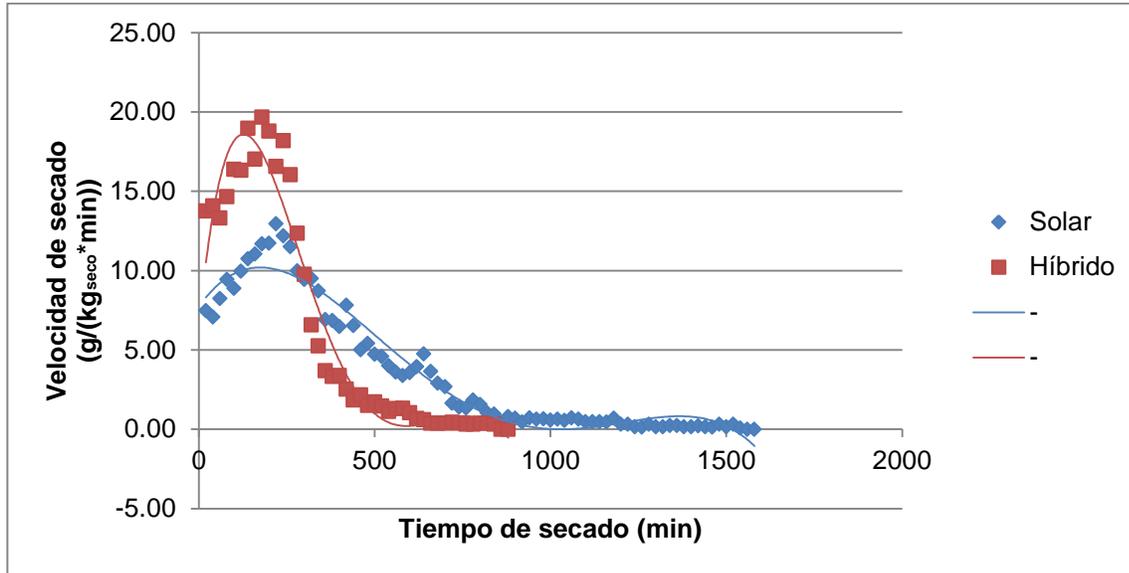
Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$
380	6,86	4,12	3,32	4,66
400	6,48	3,66	3,39	4,64
420	7,82	7,35	2,52	3,88
440	6,53	5,29	1,84	3,34
460	5,00	4,01	2,15	3,89
480	5,42	4,13	1,50	2,66
500	4,72	3,64	1,72	3,08
520	4,59	3,49	1,45	3,26
540	4,01	2,86	1,13	2,36
560	3,61	2,49	1,30	2,75
580	3,38	2,30	1,31	2,81
600	3,57	2,59	1,03	2,25
620	3,95	3,62	0,67	1,77
640	4,74	4,63	0,59	1,63
660	3,64	4,76	0,38	1,48
680	2,91	4,98	0,38	1,48
700	2,68	5,22	0,38	1,48
720	1,64	3,28	0,44	1,72
740	1,39	3,85	0,38	1,48
760	1,35	3,11	0,32	1,23
780	1,84	4,09	0,32	1,23
800	1,56	3,56	0,38	1,48
820	1,04	3,19	0,38	1,48
840	0,96	2,89	0,32	1,23
860	0,41	1,10	0,00	0,00
880	0,79	2,15	0,00	0,00
900	0,69	1,99		
920	0,45	1,19		
940	0,71	1,90		
960	0,64	1,76		
980	0,67	1,86		
1 000	0,58	1,54		
1 020	0,63	1,67		
1 040	0,55	1,49		
1 060	0,72	2,02		

Continuación de la tabla LXXXI.

Tiempo (min)	Secado solar		Secado híbrido	
	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$
1 080	0,63	1,67		
1 100	0,48	1,35		
1 120	0,48	1,32		
1 140	0,47	1,26		
1 160	0,45	1,19		
1 180	0,71	2,01		
1 200	0,31	1,20		
1 220	0,31	1,20		
1 240	0,15	0,60		
1 260	0,13	0,50		
1 280	0,31	1,20		
1 300	0,15	0,60		
1 320	0,15	0,60		
1 340	0,23	0,90		
1 360	0,23	0,90		
1 380	0,15	0,56		
1 400	0,15	0,57		
1 420	0,21	0,80		
1 440	0,15	0,60		
1 460	0,13	0,50		
1 480	0,31	1,20		
1 500	0,16	0,62		
1 520	0,31	1,20		
1 540	0,08	0,30		
1 560	0,00	0,00		
1 580	0,00	0,00		

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas LXVI y LXX.

Figura 17. **Velocidad de secado en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXXI.

Tabla LXXXII. **Modelo matemático y coeficiente de correlación de la velocidad de secado en función del tiempo**

Color	Método	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	Solar	$V = -3E-11t^4 + 1E-07t^3 - 0,0001t^2 + 0,0313t + 7,7267$	0,9541
	Híbrido	$V = 7E-13t^5 - 2E-09t^4 + 3E-06t^3 - 0,0013t^2 + 0,2241t + 6,5316$	0,9526

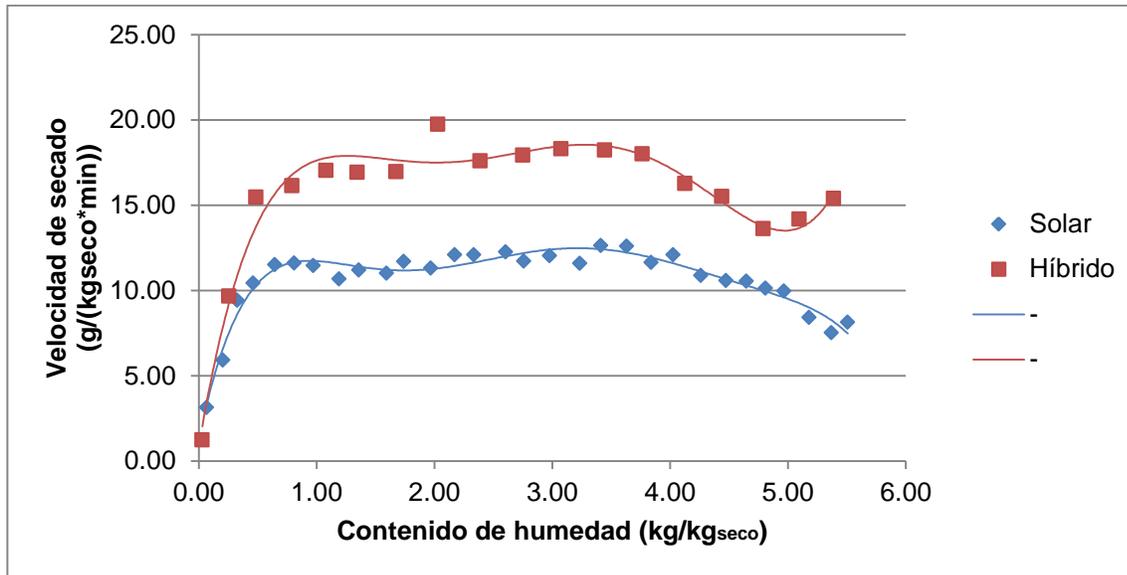
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la figura 17.

Tabla LXXXIII. **Velocidad de secado en función del contenido de humedad**

Secado solar			Secado híbrido		
Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$	Contenido de humedad (kg/kg <sub>seco</sub> )	Velocidad de secado (g/(kg <sub>seco</sub> *min))	$\pm\sigma$
5,51	8,14	3,23	5,39	15,39	5,28
5,37	7,52	2,54	5,10	14,18	3,91
5,18	8,41	2,79	4,79	13,62	3,57
4,97	9,97	4,82	4,44	15,50	3,76
4,81	10,14	4,69	4,13	16,28	4,39
4,65	10,55	7,96	3,76	18,00	4,68
4,47	10,58	6,38	3,44	18,22	5,91
4,26	10,89	5,11	3,08	18,31	5,69
4,02	12,08	5,28	2,75	17,94	5,41
3,84	11,65	6,07	2,39	17,60	5,45
3,63	12,60	5,72	2,03	19,74	7,75
3,41	12,64	6,09	1,68	16,96	7,83
3,23	11,59	5,69	1,34	16,92	6,90
2,98	12,03	5,43	1,08	17,04	6,88
2,76	11,71	6,54	0,79	16,13	7,25
2,60	12,25	6,81	0,49	15,46	6,39
2,33	12,09	7,32	0,25	9,66	7,33
2,17	12,10	7,15	0,03	1,24	3,68
1,97	11,30	8,18			
1,74	11,69	7,52			
1,59	11,02	6,25			
1,36	11,20	5,82			
1,19	10,68	6,54			
0,97	11,46	6,52			
0,81	11,61	7,75			
0,64	11,52	6,68			
0,46	10,44	6,48			
0,32	9,42	6,10			
0,20	5,92	4,64			
0,06	3,14	4,65			

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas LXVII y LXXI.

Figura 18. **Velocidad de secado en función del contenido de humedad**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXXIII.

Tabla LXXXIV. **Modelo matemático y coeficiente de correlación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad**

Color	Método	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	Solar	$V = -0,0407 \omega_p^6 + 0,7773 \omega_p^5 - 5,793 \omega_p^4 + 21,066 \omega_p^3 - 38,485 \omega_p^2 + 32,898 \omega_p + 1,2992$	0,9485
	Híbrido	$V = 0,1996 \omega_p^5 - 2,8741 \omega_p^4 + 15,239 \omega_p^3 - 37,026 \omega_p^2 + 41,206 \omega_p + 0,8793$	0,9604

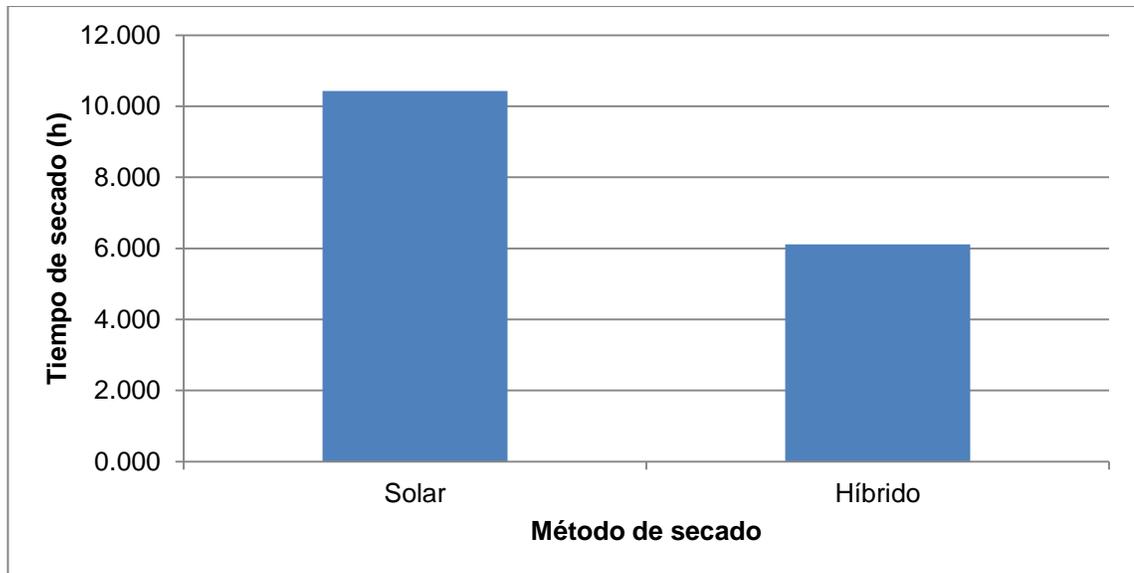
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la figura 18.

Tabla LXXXV. **Tiempo de secado hasta 0,4286 kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad**

Método	Tiempo de secado (h)	$\pm\sigma$
Secado solar	10,426	4,898
Secado híbrido	6,110	2,497

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, de las tablas LXXII y LXXIII.

Figura 19. **Tiempo de secado hasta 0,4286 kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad**



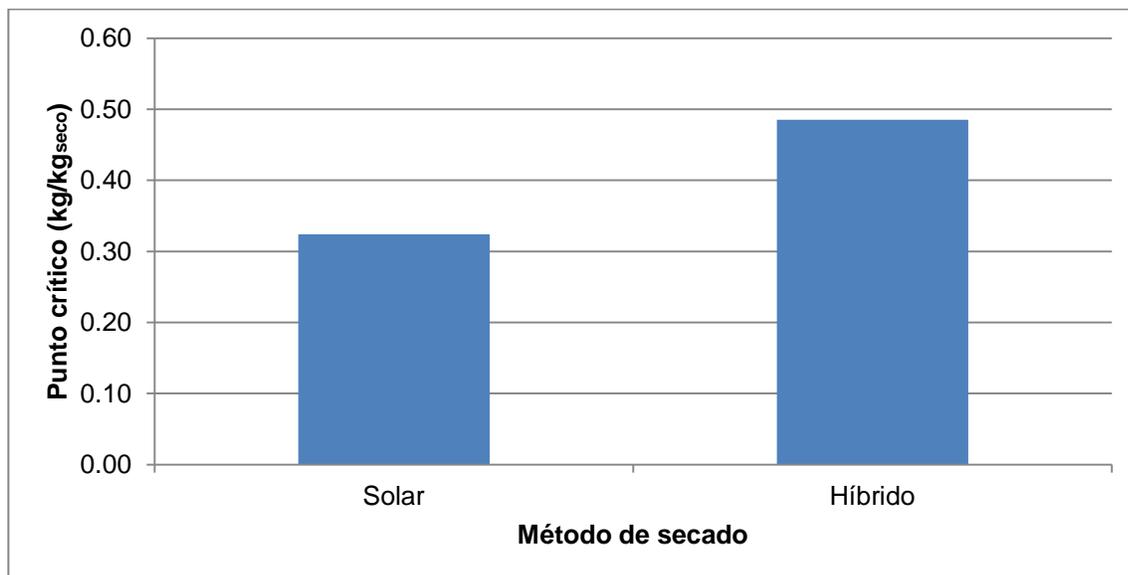
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXXV.

Tabla LXXXVI. **Punto crítico de secado**

<b>Método</b>	<b>Punto crítico (kg/kg<sub>seco</sub>)</b>
Secado solar	0,32
Secado híbrido	0,49

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la figura 18.

Figura 20. **Punto crítico de secado**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados, de la tabla LXXXVI.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La presente investigación consistió en el diseño y construcción de una unidad experimental de secado híbrido tipo armario, con el fin de realizar pruebas de secado que permitan determinar el impacto que una fuente de energía eléctrica adicional a la energía solar tiene sobre el tiempo de secado, y otros parámetros, en comparación con un secador que utiliza únicamente energía solar, para las condiciones climáticas del municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez. Se determinó diseñar el secador para deshidratar 1 kg de rodajas de durazno (*Prunus pérsica*), hasta 18 % de contenido de humedad, en base húmeda, en 12 horas.

Los parámetros de operación determinados por conveniencia, junto con otras suposiciones resumidas en la tabla III, se utilizaron como criterios para el diseño del secador experimental. Estos se relacionaron con otras variables por medio de un balance de masa y energía que permitió determinar la demanda de energía del sistema y el área necesaria del colector solar para proveer esta demanda; y por medio de un análisis de transferencia de masa que permitió determinar el área de transferencia de masa, que es el área de las bandejas en la cámara de secado. Estos resultados se presentan en la tabla LXXVI.

Con las áreas ya determinadas se procedió a dimensionar el resto del secador basándose en el diseño publicado por Bowser, específicamente en las proporciones y materiales utilizados en su diseño. Estas dimensiones se especifican en las figuras 12, 13 y 14. Luego se procedió a construir el secador experimental según el diseño y a realizar las pruebas de secado.

En la tabla LXXVII se muestra la media del contenido de humedad en función del tiempo para los dos métodos de secado y con sus desviaciones estándar, las cuales indican la variabilidad existente dentro de las repeticiones de cada experimento, también en función del tiempo. Esta tabla se encuentra representada gráficamente en la figura 15, en donde se observa que, para los dos métodos, la curva presenta una disminución continua hasta llegar a un punto a partir del cual tiende a un valor constante, que es el punto crítico de secado; apeándose así al comportamiento teórico de las curvas de secado.

Al comparar las curvas de secado de la figura 15 se puede observar que el tiempo en que se llega a un contenido de humedad constante es menor para el secado híbrido que para el secado solar, y que ambos llegaron a un contenido de humedad constante similar,  $0,1064 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  para el secado solar, y  $0,1443 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  para el secado híbrido. En la tabla LXXVIII se muestran los modelos matemáticos polinómicos de grado tres que se apegaron a los datos.

En la tabla LXXIX se puede observar el aumento de la temperatura del aire de secado en función del tiempo para los dos métodos de secado. Esta tabla se encuentra representada gráficamente en la figura 16, en donde se observa que para los dos métodos, el gradiente de temperatura aumenta hasta llegar a un valor estable alrededor de los 200 minutos, esto corresponde al aumento gradual de la irradiación desde el inicio del día hasta las diez de la mañana en que la irradiación llega a su máxima magnitud; en la curva correspondiente al secado solar se puede observar una disminución alrededor de los 500 minutos, correspondiente a la reducción de la irradiación en las últimas horas de la tarde.

También se puede observar en la figura 16 que el aumento de la temperatura es siempre mayor durante el secado híbrido, siendo el mayor

aumento de temperatura de 18,28 °C a los 200 minutos del proceso, mientras que, para el secado solar, el mayor aumento de temperatura fue de 7,09 °C a los 700 minutos de iniciado el proceso, correspondiente a un segundo día de la experimentación. Cabe mencionar que el secador se diseñó para alcanzar un aumento de temperatura de 20 °C, similar a otros secadores referidos como antecedentes, pero solamente con el secado híbrido se acercó a este valor. En la tabla LXXX se muestran los modelos matemáticos polinómicos de grado seis que se apegaron a los datos.

En la tabla LXXXI se muestra la media de la velocidad de secado en función del tiempo para los dos métodos de secado y con sus desviaciones estándar, también en función del tiempo. Esta tabla se encuentra representada gráficamente en la figura 17, en donde se observa que, para los dos métodos, la curva presenta un aumento continuo, luego tiene un valor constante durante poco tiempo, hasta llegar a un punto a partir del cual tiende a decaer, que es el punto crítico de secado, después de lo cual llega a un valor constante y mucho menor que los valores anteriores; apegándose así al comportamiento teórico de las curvas de secado.

Al comparar las curvas de secado de la figura 17 se puede observar que se alcanzaron velocidades mayores durante el secado híbrido, siendo la mayor velocidad alcanzada 19,66 g/(kg<sub>seco</sub>\*min), a los 180 minutos, comparado con la mayor velocidad alcanzada durante el secado solar, 12,95 g/(kg<sub>seco</sub>\*min) a los 220 minutos, de lo que también se puede observar que la curva de secado híbrido se desarrolló en menor tiempo que la de secado solar. En la tabla LXXXII se muestran los modelos matemáticos polinómicos que se apegaron a los datos.

En la tabla LXXXIII se puede observar la velocidad de secado en función del contenido de humedad para los dos métodos de secado. Esta tabla se encuentra representada gráficamente en la figura 18, esta para interpretarla, se debe observar de derecha a izquierda, pues conforme avanza el proceso de secado, disminuye el contenido de humedad. Para los dos métodos, a partir de su mayor contenido de humedad, que representa el inicio del proceso, la velocidad aumenta hasta llegar a un valor casi constante alrededor de los  $4 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad, para luego llegar a un punto, el punto crítico de secado, cerca de los  $0,5 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad, a partir del cual desciende marcadamente hasta valores muy bajos en comparación a los anteriores. Este comportamiento de la curva de secado es conforme al teórico.

De la figura 18 también se puede observar, como ya se vio anteriormente, que durante el secado híbrido se alcanzaron velocidades más altas que durante el secado solar, siendo las mayores velocidades alcanzadas  $12,64 \text{ g}/(\text{kg}_{\text{seco}} \cdot \text{min})$  a  $3,41 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad, y  $19,74 \text{ g}/(\text{kg}_{\text{seco}} \cdot \text{min})$  a  $2,03 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad, para secado solar e híbrido respectivamente. Pero dejando esto de lado, todo el comportamiento de las dos curvas es bastante similar, particularmente en el segmento de velocidad constante y el punto crítico, los cuales suceden a valores de contenido de humedad muy similares. Esto demuestra que el impacto de otra fuente de energía en el proceso de secado hace que el proceso suceda más rápido, pero los mecanismos de secado siguen siendo los mismos, lo que se ve reflejado en un análisis independiente del tiempo, como lo son estas curvas de secado de velocidad en función del contenido de humedad. De estas curvas de secado se suele determinar el punto crítico, puesto que lo facilitan gráficamente. En la tabla LXXXIV se muestran los modelos matemáticos polinómicos que se apegaron a los datos.

En los resultados de la tabla LXXXV y figura 19 se presentan las medias del tiempo de secado hasta  $0,4286 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad, que es el mínimo común a todas las pruebas, para los dos métodos de secado. El tiempo de secado promedio es menor para el secado híbrido, y además las desviaciones estándar indican que también es el método más preciso, lo cual se explica por la dependencia total del clima que tiene el secado solar, haciendo que su tiempo de secado sea muy variable. Cabe mencionar que el secador se diseñó para realizar el proceso de secado en 12 horas, similar a otros secadores referidos como antecedentes, pero con el secado híbrido se realizó en mucho menor tiempo.

En los resultados de la tabla LXXV se muestra el análisis de varianza de un factor, el cual compara si existe diferencia significativa entre las medias de cada experimentación. Calculando un valor del coeficiente de Fisher y contrastándolo a su valor crítico se determinó que el tiempo de secado hasta  $0,4286 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$  de contenido de humedad presenta una diferencia significativa en función del método de secado, con un 95 % de confianza. Es decir, la reducción en el tiempo de secado al combinar energía solar y eléctrica, en comparación con utilizar solamente energía solar, sí es significativa.

De las curvas de secado de la figura 18 se determinaron los puntos críticos de los procesos de secado con cada método, resultados que se presentan en la tabla LXXXVI y la figura 20, en donde se muestra que a pesar de que el punto crítico del secado híbrido es mayor que el del secado solar, estos tienen valores muy similares como se puede apreciar directamente la figura 18. Esta similitud se debe, como ya se mencionó, a que el punto crítico es dependiente del mecanismo de secado y no de la fuente de energía, y por lo tanto el mismo, o muy similar, para ambos casos.



## CONCLUSIONES

1. Se diseñó satisfactoriamente una unidad de secado solar híbrida experimental para la deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas, Sacatepéquez; y se construyó según las dimensiones determinadas.
2. Se dibujaron satisfactoriamente las curvas de secado del proceso de deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), con el secador construido, al operar únicamente con energía solar, y al operar alternando con energía solar y eléctrica.
3. El menor contenido de humedad a que se llegó a deshidratar fue de 0,1064 kg/kg<sub>seco</sub> correspondiente al secado solar.
4. El mayor aumento de temperatura del aire de secado a que se llegó fue de 18,28 °C correspondiente al secado híbrido.
5. La mayor velocidad de secado alcanzada fue de 19,74 g/(kg<sub>seco</sub>\*min), correspondiente al secado híbrido.
6. El punto crítico del proceso de deshidratación de rodajas de durazno (*Prunus persica*), con el secador construido fue de 0,32 kg/kg<sub>seco</sub> para el secado solar, y 0,49 kg/kg<sub>seco</sub> para el secado híbrido.
7. Existe diferencia significativa para el tiempo de secado en función del método de secado.

8. El tiempo de secado promedio fue de 10,426 horas para el secado solar, y 6,011 horas para el secado híbrido.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar el escalamiento a un secador solar híbrido con mayor capacidad y comparar sus resultados con la presente investigación.
2. Realizar pruebas de secado con otros productos vegetales y comparar sus resultados con la presente investigación.
3. Realizar pruebas de secado en otras regiones del país y comparar sus resultados con la presente investigación.
4. Experimentar con la adición de otras fuentes de energía, diferentes a la energía eléctrica, al secado solar y comparar sus resultados con la presente investigación.
5. Realizar pruebas de secado para diferentes grosores de rodajas de durazno (*Prunus persica*), y comparar sus resultados con la presente investigación.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AL-KAYIEM, Hussain; YUNUS, Yusheila. Drying of empty fruit bunches as wasted biomass by hybrid solar-thermal drying technique. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. [en línea]. <<https://doi.org/10.15282/jmes.5.2013.12.0063>>. [ Consulta: 24 de agosto de 2019].
2. ALLMAN, Molly. (n.d.). *The Average Width of a Peach Tree. Home Guides | SF Gate*. [en línea]. <<http://homeguides.sfgate.com/average-width-peach-tree-66469.html>>. [Consulta: 24 de agosto de 2019].
3. BOWSER, Timothy. Solar dehydrator construction plans. *Robert M. Kerr Food & Agricultural Products Center*. [en línea]. <<http://factsheets.okstate.edu/>>. [Consulta: 21 de septiembre de 2019].
4. CHAUDHARI, Ramesh; BHAVSAR, Shubham. Hybrid solar box type dryer cum cooker of chilly drying for domestic usage. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [en línea]. <<https://www.ijsr.net>>. [Consulta: 24 de agosto de 2019].
5. CHOUICHA, Samira, BOUBEKRI, Abdelghani, MENNOUCHE, Djamel; BERRBEUH, Mohamed. *Solar drying of sliced potatoes: An experimental investigation. TerraGreen 13 International Conference 2013 – Advancements in Renewable Energy and*

*Clean Environment, Energy Procedia*. [en línea].  
<<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.144>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].

6. DE LEÓN, Pablo. *Diseño de un secador solar para madera híbrido y automático con ventilación forzada para aplicación en proyectos de docencia, investigación y servicio de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestría en Energía y Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, ciudad de Guatemala, [en línea].  
<<http://www.repositorio.usac.edu.gt/5226/1/Pablo%20Christian%20De%20Le%C3%B3n%20Rodr%C3%ADguez.pdf>>. [Consulta: 13 de septiembre de 2019].
7. Engineering Toolbox. *Specific heat of food and foodstuff*. [en línea].  
<[https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d\\_295.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html)>. [Consulta: 24 de mayo de 2020].
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. [en línea].  
<<http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf>>. [Consulta: 23 de febrero de 2020].
9. Fundación Celestina Pérez de Almada. *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. [en línea].  
<<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Monte>

video/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>. [Consulta: 13 de septiembre de 2019].

10. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A., 1998. 1 008 p.
11. GREEN, Don; PERRY, Robert. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8a ed. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008. 2 735 p.
12. GWALA, Wishmore; PADMAVATI, Ravichandran. Comparative study of indirect solar drying, electric tray drying and open sun drying of pineapple slices using drying kinetics and drying models. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. [en línea]. <<https://www.ijltemas.in>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].
13. HIMMELBLAU, David. *Principios básicos y cálculos en ingeniería química*. 6a ed. Naucalpan de Juárez, México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1997. 728 p.
14. HOSSAIN, Mohammed, AMER, Baher; GOTTSCHALK, Klaus. *Hybrid solar dryer for quality dried tomato. Drying Technology*. [en línea]. <<https://doi.org/10.1080/07373930802467466>>. [Consulta: 20 de agosto de 2019].
15. HUSSEIN, Jelili, HASSAN, Mudathir, KAREEM, Semiu; FILLI, Kalep. *Design, construction and testing of a hybrid photovoltaic (PV) solar dryer. International Journal of Engineering Research and General*

Science. [en línea]. <<https://doi.org/10.25125/engineering-journal-IJOER-MAY-2017-4>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].

16. \_\_\_\_\_. *Effect of hybrid solar drying method on the functional and sensory properties of tomato. American Journal of Food Science and Technology.* [en línea]. <<https://doi.org/10.12691/ajfst-4-5-4>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].
17. Instituto Nacional de Estadística. *Caracterización estadística República de Guatemala 2012.* [en línea]. <<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2014/02/26/5eTCcFIHErnaNVeUmm3iabXHaKgXtw0C.pdf>>. [Consulta: 23 de febrero de 2020].
18. \_\_\_\_\_. *Hoja de balance de alimentos 2013.* [en línea]. <<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2015/03/13/MLnekEa06pp3BVhIFWFnKcJzKKDDX3el.pdf>>. [Consulta: 23 de febrero de 2020].
19. \_\_\_\_\_. *Canasta básica alimentaria (CBA) y canasta ampliada (CA) enero de 2019.* [en línea]. <<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2019/02/07/20190207114816Qr9erLDhFszDZ3AgrA5NDIVCs9KURG0w.pdf>>. [Consulta: 23 de febrero de 2020].
20. JIN, Xin. *Drying of healthy foods from mechanism to optimization. Universidad de Wageningen, Países Bajos.* [en línea]. <<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/278187>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].

21. KHAMA, Réda, AISSANI, Farida; ALKAMA, Rezak. *Design and performance testing of an industrial-scale indirect solar dryer. Journal of Engineering Science and Technology*. [en línea]. <jestec.taylors.edu.my>. [Consulta: 24 de agosto de 2019].
22. MCCABE, Warren, SMITH, Julian; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana, 1991. 1 112 p.
23. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *El agro en cifras 2016*. [en línea]. <https://precios.maga.gob.gt/archivos/agro-en-cifras/El%20Agro%20En%20Cifras%20-%202016.pdf>. [Consulta: 30 de octubre de 2020].
24. MIRELES, Janeth, CARRERA, Ethson, GARCÍA, Victor; GARCÍA, Juan. *Deshidratado de durazno (Prunus pérsica). Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. [en línea]. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/>. [Consulta: 7 de agosto de 2020].
25. MONTGOMERY, Douglas. *Design and analysis of experiments*. 8a ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013. 724 p.
26. REYES, Alejandro, MAHN, Andrea, HUENULAF, Pedro; GONZÁLEZ, Tamara. *Tomato dehydration in a hybrid-solar dryer. Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. [en línea]. <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000196>. [Consulta: 24 de agosto de 2019].

27. SAJITH, Kurup; MURALEEDHARAN, Chandrasekharan. *Economic analysis of a hybrid photovoltaic/thermal solar dryer for drying amla. International Journal of Engineering Research & Technology*. [en línea]. <<https://www.ijert.org>>. [Consulta: 21 de agosto de 2019].
  
28. Weather Spark. *El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala*. [en línea]. <<https://es.weatherspark.com/y/11655/Clima-promedio-en-San-Bartolom%C3%A9-Milpas-Altas-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>>. [Consulta: 20 de agosto de 2019].
  
29. WELTY, James, WICKS, Charles, WILSON, Robert; RORRER, Gregory. *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. 5a ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2008. 711 p.

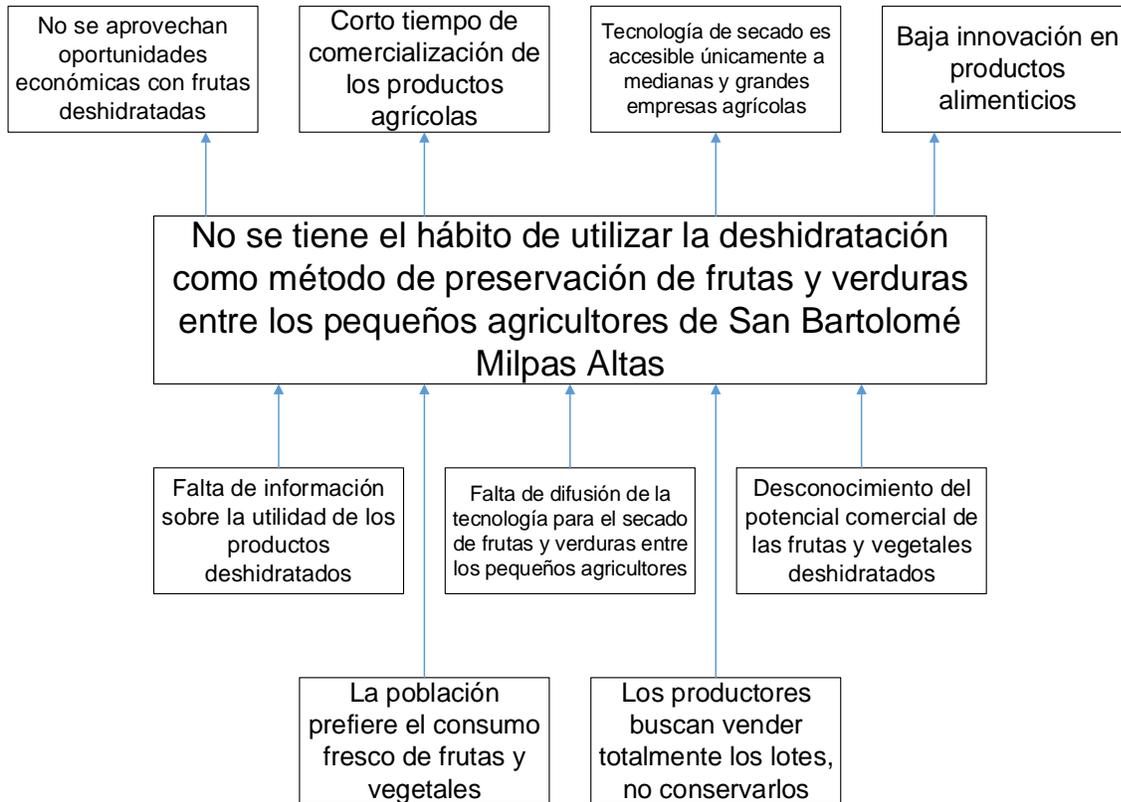
## APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Tema específico
Ingeniería Química	Operaciones Unitarias	Laboratorio de Ingeniería Química	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración de curvas de secado.</li> </ul>
		Transferencia de Masa Unidades Continuas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso de secado.</li> </ul>
		Balance de Masa y Energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance de masa y energía.</li> </ul>
	Especialización	Diseño de Equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criterios de diseño.</li> </ul>
		Introducción a la Gestión Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innovación de productos.</li> </ul>
		Refrigeración y Aire Acondicionado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carta psicrométrica.</li> <li>• Cálculos de aire húmedo.</li> </ul>
		Tecnología de los Alimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deshidratación de alimentos.</li> <li>• Secadores solares.</li> <li>• Pre-tratamientos.</li> </ul>
	Fisicoquímica	Termodinámica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujos de energía en equipos.</li> <li>• Tablas de vapor.</li> </ul>
	Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas de hipótesis.</li> <li>• Análisis de varianza.</li> </ul>
		Matemática Básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de polinomios.</li> </ul>

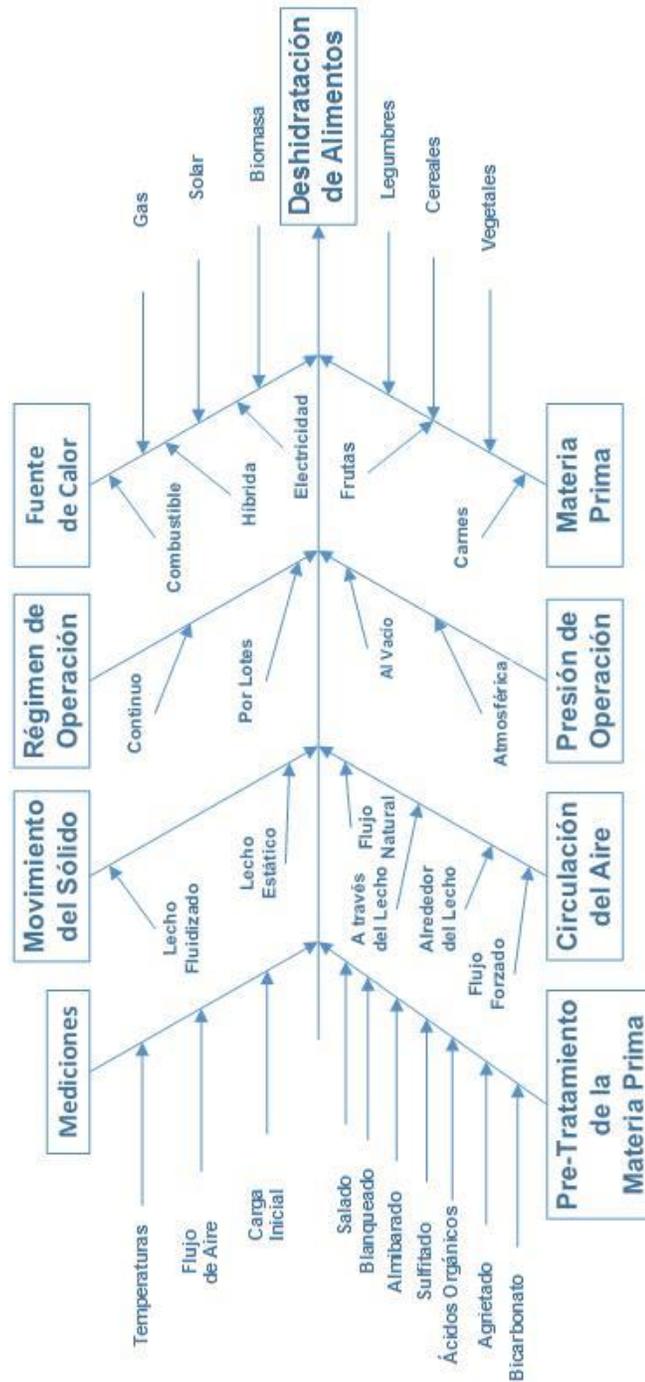
Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Apéndice 3. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Apéndice 4. **Datos usados en los cálculos para el diseño**

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Referencia
Temperatura de rocío promedio	$T_{dp}$	12°C	El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, 2017.
Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado	$T_f$	70,71°F	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Volumen específico del aire de secado	$V_{a1}$	0,8556m <sup>3</sup> /kg <sub>seco</sub>	GREEN Y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Calor específico del durazno ( <i>Prunus pérsica</i> ) a 85% de humedad.	$C_{pdurazno}$	3,73 kJ/kg°C	Engineering Toolbox, 2003.
Calor específico del agua a presión constante a 30°C	$C_{pw}$	4,1851 kJ/kg°C	Engineering Toolbox, 2003.
Irradiancia solar promedio	$E_e$	479W/m <sup>2</sup>	El clima promedio en San Bartolomé Milpas Altas Guatemala, 2017.
Viscosidad cinemática del aire a 30°C y presión atmosférica	$\nu$	1,69E-5 m <sup>2</sup> /s	GREEN y PERRY, 2008.

Continuación del apéndice 4.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Referencia
Producto de la presión por el coeficiente de difusión de agua en aire a 298K	$D_{AB,298K} * P$	2,634 m <sup>2</sup> Pa/s	WELTY, et al., 2008
Contenido de humedad del aire a punto de rocío de 12°C	$\omega_{a1}$	0,0087 kg/kg <sub>seco</sub>	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Contenido de humedad del aire de salida f(T <sub>f</sub> ,100%HR)	$\omega_{a2}$	0,0162 kg/kg <sub>seco</sub>	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Entalpía del agua a 70.71°F	H <sub>w2</sub>	90,22 kJ/kg	GREEN y PERRY, 2008.
Entalpía del agua a 13°C	H <sub>w1</sub>	54,60 kJ/kg	GREEN y PERRY, 2008.
Entalpía del aire de salida f(T <sub>f</sub> ,100%HR)	H <sub>a2</sub>	34,63 Btu/lb	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Entalpía del aire de entrada f(T <sub>a0</sub> , $\omega_{a1}$ )	H <sub>a0</sub>	25,85 Btu/lb	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.
Contenido de humedad de saturación del aire a 40°C	$\omega_{sat}$	0,0489 kg/kg <sub>seco</sub>	GREEN y PERRY, 2008, figura 12-2a.

Fuente: elaboración propia, con base en las referencias especificadas de autores que publican tablas de datos termodinámicos.

## Apéndice 5. Resolución del balance de masa y energía

### Balance de masa

La masa del sólido se calculó a partir de la carga de materia prima y su contenido de humedad estimados:

$$M_p = M_{p1}(1-W_{p1}) = 1 \text{ kg}*(1-0,85) = 0,15 \text{ kg}$$

A partir de la humedad estimada en base húmeda, se calculó el contenido de humedad en base seca de la siguiente manera:

$$\omega_{p1} = W_{p1}/(1-W_{p1}) = 0,85/(1-0,85) = 5,67 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$$

$$\omega_{p2} = W_{p2}/(1-W_{p2}) = 0,18/(1-0,18) = 0,22 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}$$

La masa de aire se calculó resolviendo el balance de masa de la tabla II:

$$M_p\omega_{p1} + M_a\omega_{a1} = M_p\omega_{p2} + M_a\omega_{a2}$$

$$(0,15 \text{ kg})*(5,67 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}) + M_a*(0,0087 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}) = (0,04 \text{ kg})* \\ (0,22 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}) + M_a*(0,0162 \text{ kg/kg}_{\text{seco}})$$

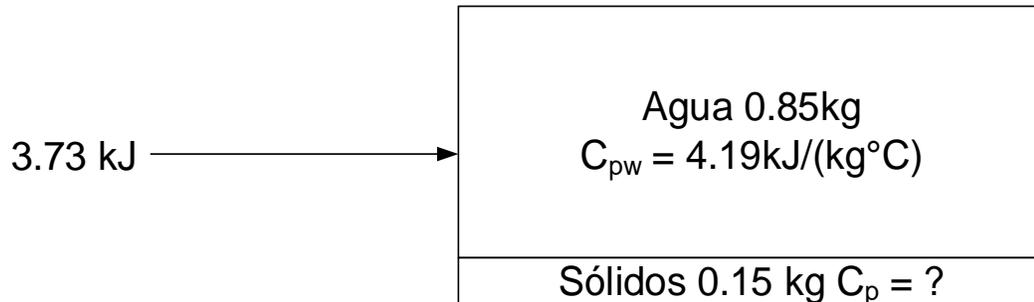
$$M_a = 109,95 \text{ kg}$$

### Balance de energía

El calor específico del durazno es aproximadamente 3,73 kJ/(kg °C). Este es el calor específico del durazno con su contenido de humedad, y para los cálculos de balance de energía se necesita el calor específico del sólido sin

Continuación apéndice 5.

contenido de humedad. Para calcular el parámetro requerido se supone un proceso de calentamiento de un kg de durazno en 1 °C, y se supone que el durazno tiene 85 % de contenido de humedad en base húmeda (Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005). Entonces, el balance de energía de este proceso es:



$$3,73\text{kJ} = 0,85 \text{ kg} \cdot 4,19 \text{ (kJ/(kg } ^\circ\text{C))} \cdot 1 \text{ } ^\circ\text{C} + 0,15 \text{ kg} \cdot C_p \cdot 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 1,12 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$$

La energía requerida para el sistema se calculó resolviendo el balance de energía de la tabla II:

$$Q\mu = M_p[C_p(T_f - T_{p1}) + \omega_{p2}H_{w2} - \omega_{p1}H_{w1}] + M_a(H_{a2} - H_{a0})$$

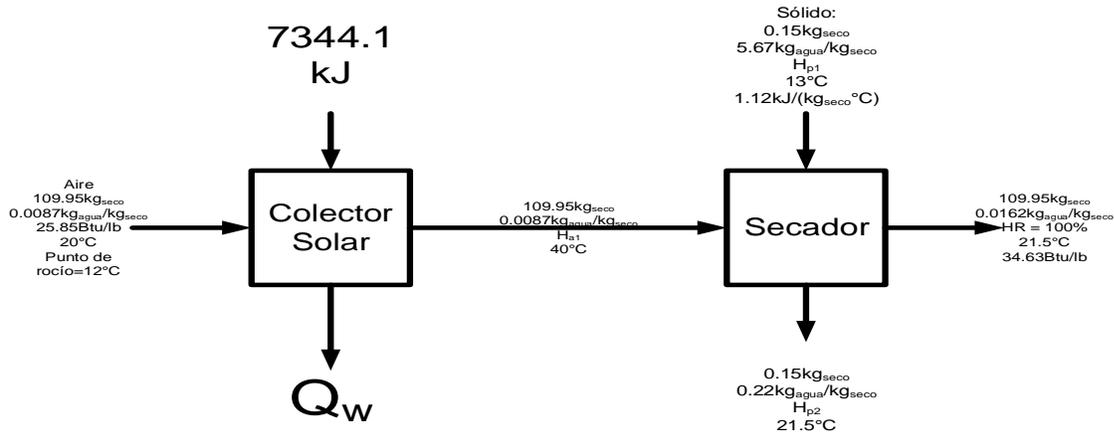
$$Q \cdot 0,30 = 0,15 \text{ kg} \cdot [(1,12 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}) \cdot (21,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 13 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$+ (0,22 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}) \cdot (90,2246 \text{ kJ/kg}) - (5,67 \text{ kg/kg}_{\text{seco}}) \cdot (54,6024 \text{ kJ/kg})]$$

$$+ 27,49 \text{ kg} \cdot (80,5 \text{ kJ/kg} - 60,1 \text{ kJ/kg})$$

$$Q = 7344,1 \text{ kJ}$$

Continuación apéndice 5.



El colector solar debe proveer la energía del sistema durante el proceso de secado, que se estima de alrededor de 12 horas, entonces la potencia es:

$$\dot{Q} = (7344,1 \text{ kJ}/12 \text{ h}) * (1\text{h}/3\ 600\text{s}) = 0,17 \text{ kW} = 170 \text{ W}$$

Y el área necesaria para el colector:

$$A_c = \frac{\dot{Q}}{E_e} = 170 \text{ W}/(479 \text{ W}/\text{m}^2) = 0,355 \text{ m}^2$$

Siguiendo las proporciones propuestas por Bowser el colector es un rectángulo cuyo largo es cuatro veces mayor que el ancho, por lo cual el ancho es de:

$$L_{\text{ancho}} = \sqrt{\frac{0,355\text{m}^2}{4}} = 0,298 \text{ m} = 29,8 \text{ cm}$$

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. Resolución del análisis de transferencia de masa

El flujo volumétrico del aire se puede determinar de la siguiente manera:

$$\dot{V}_a = M_a * V_{a1}/t$$
$$\dot{V}_a = (109,95 \text{ kg} * (0,8556 \text{ m}^3/\text{kg}) / 12 \text{ h}) * (1 \text{ h} / 3600 \text{ s}) = 0,0022 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las bandejas de la cámara de secado son cuadradas y los lados son de la misma medida que el ancho del colector, 29,8 cm, con el fin de que la cámara se pueda acoplar a este. Además, según el modelo de Bowser (2017), la altura entre una bandeja y otra en la cámara de secado es una sexta parte de la longitud del lado de la bandeja:

$$h_{\text{bandeja}} = 29,8 \text{ cm} / 6 = 5,0 \text{ cm}$$

Por lo que, aproximando a que el aire pasa horizontalmente sobre las bandejas, el área de una sección transversal a través de la cual debe fluir es:

$$A_{\text{aire-bandeja}} = 0,298 \text{ m} * 0,050 \text{ m} = 0,0148 \text{ m}^2$$

Con lo cual se puede estimar la velocidad con que el aire de secado pasa sobre las bandejas que contienen el sólido:

$$v_{\infty} = (0,0022 \text{ m}^3/\text{s}) / (0,0148 \text{ m}^2) = 0,147 \text{ m/s}$$

El largo de la bandeja es de 29,8 cm, pero no toda la bandeja estará llena de rodajas del sólido, Bowser recomienda que un 15 % de esta longitud, por cada extremo, sea un espacio libre para circulación de aire de secado, siendo un 70 % de esta longitud efectivamente para transferencia.

Continuacion apéndice 6.

$$L = 29,8 \text{ cm} * 0,7 = 20,8 \text{ cm}$$

Con estos datos se puede calcular el número de Reynolds al final de la lámina:

$$Re_L = \frac{v_\infty L}{\nu} = \frac{\left(\frac{0,147 \text{ m}}{\text{s}}\right) * 0,208 \text{ m}}{1,69 \text{ E} - 5 \text{ m}^2/\text{s}} = 1760$$

Y dado que es menor que 200 000, significa que el flujo es únicamente laminar en todo momento, y se utiliza únicamente la analogía de la solución de Blasius Welty.

$$\bar{k}_c = \frac{0,664 D_{AB} Re_L^{1/2} Sc^{1/3}}{L}; Re_L < 2,0 * 10^5$$

Para lo cual se necesita calcular el número de Schmidt:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

Y a su vez el coeficiente de difusividad:

$$D_{AB,298K} * P = 2,634 \text{ m}^2 \text{ Pa/s}$$
$$D_{AB,298K} = \frac{2,634 \text{ m}^2 \text{ Pa/s}}{P} = \frac{2,634 \text{ m}^2 \text{ Pa/s}}{101\,325 \text{ Pa}} = 2,60 \text{ E} - 5 \text{ m}^2/\text{s}$$

Corrigiendo:

Continuación apéndice 6.

$$D_{AB} = D_{AB,298K} * \left(\frac{313K}{298K}\right)^{\frac{3}{2}} = 2,60 E - \frac{5 m^2}{s} * \left(\frac{313K}{298K}\right)^{\frac{3}{2}} = 2,80E - 5 m^2/s$$

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} = \frac{1,69E - 5 m^2/s}{2,80E - 5 m^2/s} = 0,61$$

$$\bar{k}_c = \frac{0,664 D_{AB} Re_L^{1/2} Sc^{1/3}}{L} = \frac{(0,664)(2,80E - 5 m^2/s)(1760)^{1/2}(0,61)^{1/3}}{0,208 m}$$

$$= 0,0033 m/s$$

Dado el coeficiente promedio de transferencia de masa, se relaciona por analogía a la ley de enfriamiento de Newton con el área de transferencia de masa.

$$A = \frac{w_A}{\bar{k}_c(\rho_A^* - \rho_{A\infty})}$$

Donde la transferencia de masa deseada es:

$$w_A = \frac{M_p * (\omega_{p1} - \omega_{p2})}{t} = \frac{0,15 kg_{seco} * (5,67 \frac{kg}{kg_{seco}} - 0,22 kg/kg_{seco})}{12 h * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right)}$$

$$= 1,89 E - 5 kg/s$$

La concentración máxima de agua en aire a 40 °C es:

$$\rho_A^* = \frac{\omega_{sat}}{V_{a1}} = \frac{0,0489 kg/kg_{seco}}{0,8556 m^3/kg_{seco}} = 0,0571 kg/m^3$$

Continuación apéndice 6.

Y la concentración promedio de agua en el aire de secado es:

$$\rho_{A\infty} = \frac{(\omega_{a1} + \omega_{a2})/2}{V_{a1}} = \frac{\left(0,0087 \frac{kg}{kg_{seco}} + 0,0162 \frac{kg}{kg_{seco}}\right)/2}{0,8556 m^3/kg_{seco}} = 0,0145 kg/m^3$$

Entonces:

$$A = \frac{w_A}{\bar{k}_c(\rho_A^* - \rho_{A\infty})} = \frac{1,89 E - 5 kg/s}{0,0033 m/s(0,0571 \frac{kg}{m^3} - 0,0145 kg/m^3)} = 0,112 m^2$$

El área de transferencia de masa que tiene una bandeja es de:

$$A_{bandeja} = L^2 = (0,208 m)^2 = 0,043 m^2$$

Entonces, el número de bandejas necesarias para alcanzar el área de transferencia requerida es:

$$Bandejas = \frac{0,112 m^2}{0,043 m^2} = 2,57 \approx 3$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Estructura metálica del secador**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Construcción de la cámara de secado y colector solar**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Calefactor eléctrico**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Secador solar híbrido experimental construido**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Materia prima al inicio de una prueba de secado**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Sólido al final de una prueba de secado solar**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Sólido al final de una prueba de secado híbrido**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Producto final a 0,22 kg/kg<sub>seco</sub> de contenido de humedad**



Fuente: elaboración propia.

