



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Modelado, simulación y caracterización de un secador solar para estudiar la cinética de secado de productos agrícolas en Tabasco.

TESIS

para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Gabriel Martínez Pereyra

Director:

Dr. Germán Pérez Hernández

Cunduacán, Tabasco

Agosto de 2018



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

OFICIO: DIR/DAIA/1516/2018
FECHA: 1 de Agosto 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva

C. M.C. GABRIEL MARTÍNEZ PEREYRA
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"MODELADO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA ESTUDIAR LA CINÉTICA DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TABASCO"

Para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Germán Pérez Hernández ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR

**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



C.c.p. Archivo

Dr.GPH/Dra.MAL/apl.



Carretera Cuauacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda C.P. 86690 Cuauacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 12 de Julio de 2018
MEM/DCI/014/2018

PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"MODELADO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA ESTUDIAR LA CINÉTICA DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TABASCO"

Desarrollado por el C. M.C. GABRIEL MARTÍNEZ PEREYRA del Doctorado en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL

Angela S. M. López
DRA. ANGÉLICA SILVESTRE LÓPEZ
RODRÍGUEZ
PRESIDENTE

Pío Sifuentes Gallardo
DR. PIO SIFUENTES GALLARDO
SECRETARIO

Dr. Germán Pérez Hernández
DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
VOCAL 1

Dr. Joel Pantoja Enriquez
DR. JOEL PANTOJA ENRIQUEZ
VOCAL 2

Dr. Guillermo Ibañez Duarte
DR. GUILLERMO IBÁÑEZ DUHARTE
VOCAL 3

Dr. Lizeth Rojas Blanco
DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
VOCAL 4

Dr. Erik Ramírez Morales
DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
VOCAL 5



Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358 1500 Ext. 6752
dirección.dia@ujat.mx

www.ujat.mx

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto físicamente como digitalmente la tesis de grado denominada **"MODELADO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA ESTUDIAR LA CINÉTICA DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TABASCO"**, de la que soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la universidad tenga relación institucional.

Por lo antes mencionado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco, a los 02 días del mes de Agosto del año 2018.

AUTORIZO



M.C. GABRIEL MARTÍNEZ PEREYRA

Dedicatoria

A Dios por ayudarme cumplir esta meta

A mis Padres: Remedios Martínez Hernández

A mi esposa: Yolanda Córdova Bautista e Hijos: Ángel Gabriel y Karla Gabriela Martínez Córdova.

A mis Hermanos: David, Martín, Rosa, Isabel, Concepción Martha, Ramón, Claudia, Carlos, Juana.

Agradecimientos

3

Deseo expresar en estas líneas mi agradecimiento a las personas sin cuya colaboración no hubiera sido posible la realización de esta tesis.

Al Dr. Germán Pérez Hernández, por su dirección para la realización de este proyecto, su apoyo, disposición, consejos y enseñanza para la culminación de esta investigación.

A la comisión Revisadora de esta tesis por sus consejos y observaciones realizadas a este trabajo: Dra. Angélica Silvestre López, Dr. PIO Sifuentes Gallardo, Dr. Joel Pantoja Enriquez, Dr. Guillermo Ibáñez Duharte, Dra. Lizeth Rojas Blanco, Dr. Erik Ramírez Morales.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por permitirme realizar mis estudios de posgrado dentro del programa de Doctorado en Ciencias de en Ingeniería y por el financiamiento otorgado.

A todas las personas que, directa o indirectamente, me han ayudado en las distintas etapas de la realización del trabajo.

ÍNDICE	PÁGINA
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
NOMENCLATURA	VII
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.1.1. Objetivos específicos.....	3
1.2. Descripción del contenido	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. La energía solar	4
2.1.1. Radiación solar en la superficie terrestre.....	5
2.1.2. Geometría solar	6
2.1.2.1. Declinación solar	6
2.1.2.2. Ángulo de incidencia	7
2.1.2.3. Altura solar	7
2.1.2.4. Altura de culminación	7
2.1.2.5. Orto y ocaso solar	7
2.1.2.6. Ángulo horario	7
2.2 Proceso de secado	7
2.2.1. Contenido de humedad de un producto.....	8
2.2.2. Actividad de agua y humedad de equilibrio	9
2.2.3. Razón de humedad y velocidad de secado	10
2.2.4. Ajuste de los modelos de secado	12
2.2.5. Difusividad de humedad efectiva	12
2.2.6. Energía de activación	13
2.2.7. Isotermas de sorción	13
2.2.8. Psicrometría del proceso de secado.....	14
2.3. Secadores solares	16
2.3.1. Colectores solares	18
2.3.1.1. Angulo de inclinación de un colector	19

2.3.1.2. Producto Transmisividad-absortividad.....	20
2.3.2. Cámara de secado	21
2.4. Producto a secar	21
2.4.1. Plátano.....	21
2.4.2. Taro.....	22
2.4.3. Mango.....	23
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1. Análisis del colector solar.....	24
3.1.1. Dimensionamiento de los colectores solares.....	24
3.1.2. Análisis teórico.....	24
3.1.3 Consideraciones del análisis	25
3.2. Cinética de secado en capa delgada de plátano cuadrado y taro en condiciones controladas	29
3.2.1. Configuración experimental	29
3.2.2. Procedimiento experimental	30
3.2.3. Razón de humedad y velocidad de secado	30
3.2.4. Ajuste de las curvas de secado	31
3.2.5. Difusividad de humedad efectiva y energía de activación	31
3.3. Cinética de secado en capa delgada de taro y de mango verde tommy en el secador solar	32
3.3.1. Procedimiento experimental.	32
3.3.2. Razón de humedad y velocidad de secado	33
3.3.3. Ajuste de los modelos de secado	33
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1. Análisis del colector solar.....	34
4.2. Cinética de secado en capa delgada de plátano cuadrado y taro en el laboratorio	40
4.2.1. Curvas de secado y velocidad de secado.....	40
4.2.2. Ajuste de las curvas de secado	43
4.2.3. Difusividad de humedad efectiva y energía de activación	44
4.3. Cinética de secado en capa delgada del taro y del mango verde en el secador solar	47
4.3.1. Construcción del secador solar.....	47

4.3.2. Cinética de secado del taro	49
4.3.2.1. Radiación solar y temperatura ambiente	49
4.3.2.2. Razón de humedad y velocidad de secado	50
4.3.2.3. Ajuste de los modelos de secado	52
4.3.3. Cinética de secado del mango.....	53
4.3.3.1. Razón de humedad y velocidad de secado	53
4.3.3.2. Ajuste de los modelos de secado	54
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	57
5.1. Conclusiones	57
5.2. Investigaciones futuras	59
REFERENCIAS	60

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Variación de la radiación extraterrestre a lo largo del año	4
2.2. Componentes de la radiación solar en una superficie inclinada.....	5
2.3. Declinación solar	6
2.4. Altura solar y ángulo de incidencia.....	6
2.5. Isotermas de sorción de un material	14
2.6. Psicrometría del proceso de secado	15
2.7. Tipos de sistemas de secado solar	16
2.8. Sistemas de secado solar (a) activo, (b) pasivo	17
2.9. Colector solar de aire	18
3.1. Colector solar de placas planas con recubrimiento selectivo.	25
3.2. Colector solar de placas onduladas con recubrimiento comercial negro mate.....	25
3.3. Esquema del secador de laboratorio.....	29
4.1 Variación de la temperatura ambiente el 26 de mayo del 2016	34
4.2. Variación de la radiación solar y el calor útil el 26 de mayo del 2016	34
4.3 Coeficiente de transferencia de calor por radiación contra el tiempo	36
4.4. Variación de la eficiencia el 26 de mayo del 2016	36
4.5. Variación de la temperatura en la cubierta el 26 de mayo del 2016.....	37
4.6. Variación de la temperatura en la placa absorbedora el 26 de mayo del 2016.....	38
4.7. Variación de la temperatura en la placa de fondo el 26 de mayo del 2016	38
4.8. Variación de la temperatura en el aire del canal superior el 26 de mayo del 2016.....	39
4.9. Variación de la temperatura en el aire del canal inferior el 26 de mayo del 2016 ..	40
4.10. Razón de humedad contra el tiempo de secado (a) taro, (b) plátano.....	41
4.11. Velocidad de secado contra razón de humedad (a) taro, (b) plátano.....	42
4.12. Razón de humedad experimental y ajustada contra tiempo de secado (a) taro y (b) plátano	44
4.13 Ajuste lineal de $\ln(MR_{db})$ experimental contra el tiempo de secado (a) taro y (b) plátano	45
4.14 Relación de Arrhenius (a) taro, (b) plátano	47
4.15a. Panel de poliuretano revestido con lámina de acero galvanizado.....	48
4.15b. Placa con recubrimiento selectivo	48
4.16. Colector solar de placa absorbedora plana con recubrimiento selectivo.....	48
4.17. Cámara de secado del secador solar.....	48

4.18. Secador solar construido.....	49
4.19. Radiación solar y temperatura ambiente frente al tiempo	49
4.20. Razón de humedad	51
4.21. Velocidad de secado contra la razón de humedad.....	51
4.22. Comparación entre la razón de humedad experimental y ajustada	53
4.23. Razón de humedad del mango	54
4.24. Velocidad de secado en función de la razón de humedad	54
4.25. Comparación entre los datos experimentales y las curvas ajustadas con los modelos probados de la razón de humedad.	55
4.26. Comparación de MR experimental y predicha con el modelo de Page.	56

México.

Juárez Autónoma de Tabasco.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Modelos matemáticos utilizados para predecir la cinética de secado	31
Tabla 4.1. Resultados del análisis de regresión de los modelos que mejor se ajustaron	43
Tabla 4.2. Difusividad de humedad efectiva.....	46
Tabla 4.3. Resultados del análisis de regresión de los modelos que mejor se ajustaron	52
Tabla 4.4. Resultado del ajuste de los modelos probados	56

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

NOMENCLATURA

Capítulo 2

D_{eff}	Difusividad de humedad efectiva ($m^2 s^{-1}$)
DR	Velocidad de secado ($kg\ agua\ kg^{-1}\ materia\ seca\ h^{-1}$)
D_o	Factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius ($m^2 s^{-1}$)
E_a	Energía de activación ($J\ mol^{-1}$)
H_B	Radiación directa ($W\ m^{-2}$)
H_D	Radiación difusa ($W\ m^{-2}$)
H_G	Radiación global ($W\ m^{-2}$)
H_R	Radiación reflejada ($W\ m^{-2}$)
h	Altura solar (radianes)
h_c	Altura de culminación (radianes)
I_G	Radiación solar extraterrestre promedio ($1367\ W\ m^{-2}$)
I_S	Radiación solar total sobre una superficie normal a los rayos solares situada en el exterior de la atmósfera ($W\ m^{-2}$)
I	Radiación solar incidente en la cubierta ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
L	Semi-espesor de las rebanadas (m)
M_{wb}	Humedad en base húmeda ($kg\ agua\ kg^{-1}\ producto\ húmedo$)
M_{db}	Humedad en base seca ($kg\ agua\ kg^{-1}\ producto\ seco$)
M_t	Humedad en el tiempo t
M_{t+dt}	Humedad en el tiempo $t+dt$
M_o	Humedad inicial
M_e	Humedad de equilibrio.
MR_{db}	Razón de humedad en base seca
m_o	Masa inicial de materia sin secar (kg)
m_d	Masa de materia seca (kg)
R	Constante de los gases ($8\ 314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)
S	Radiación solar absorbida ($W\ m^{-2}$)
T	Temperatura del aire de secado (K)
ρ_d	Reflectividad para radiación difusa de la cubierta
t	Tiempo de secado (s)

n	Día del año
n_h	Número de horas antes o después del mediodía solar
α	Absortividad
β	Inclinación del colector respecto de la horizontal (radianes)
δ	Declinación solar (radianes)
ρ_d	Reflectividad para radiación difusa de la cubierta
ϕ	Latitud de la zona geográfica
τ	Transmisividad
Θ	Ángulo de incidencia sobre una superficie en un punto (radianes)
ω_h	Ángulo horario (radianes)
$+\omega_s$	Orto solar (radianes)
$-\omega_s$	Ocaso solar (radianes)

Capítulo 3

A_c	Área del colector (m^2)
C_{pa}	Calor específico del aire ($1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
D_h	Diámetro hidráulico (m)
h_{ci}	Coefficiente de transferencia de calor por conducción a través del aislamiento ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
H_c	Distancia media entre la placa absorbadora y la cubierta de vidrio (m)
$h_{c,uac}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el aire en el canal superior ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
$h_{c,lab}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire en el canal inferior y la placa del fondo ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
$h_{c,uaa}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire en el canal superior y la placa absorbadora ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
$h_{c,laa}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire en el canal inferior y la placa absorbadora ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
h_{cw}	Coefficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta de vidrio al viento ($W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

H_g	Distancia media entre la placa absorbadora y la placa inferior (m)
$h_{r,cs}$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el cielo ($W m^{-2} K^{-1}$)
$h_{r,ac}$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa absorbadora y la cubierta de vidrio ($W m^{-2} K^{-1}$)
$h_{r,ab}$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa absorbadora y la placa del fondo
I	Radiación solar incidente en la cubierta ($W m^{-1} K^{-1}$)
k_i	Conductividad térmica del aislamiento ($W m^{-1} K^{-1}$)
m_a	Flujo másico del aire en el canal superior e inferior ($kg s^{-1}$)
NU_{uaa}	Número de Nusselt entre la placa absorbadora y el aire superior
NU_{iaa}	Número de Nusselt entre la placa absorbadora y el aire inferior
NU_{uac}	Número de Nusselt entre la cubierta de vidrio y el aire superior
NU_{iab}	Número de Nusselt entre la placa de fondo y el aire inferior
Q_{ua}	Energía útil ganada en el aire del canal superior ($W m^{-2}$)
Q_{ia}	Energía útil ganada en el aire del canal inferior ($W m^{-2}$)
Q_a	Energía útil ganada en el aire de ambos canales ($W m^{-2}$)
Re	Número de Reynolds
S	Radiación solar absorbida por la placa absorbadora ($W m^{-2}$)
T_a	Temperatura en la placa absorbadora (K)
T_{am}	Temperatura ambiente (K)
T_b	Temperatura en la placa del fondo (K)
T_c	Temperatura en la cubierta de vidrio (K)
T_s	Temperatura del cielo (K)
T_{ua}	Temperatura media en el aire del canal superior (K)
T_{ia}	Temperatura media en el aire del canal inferior (K)
T_{uai}	Temperatura de entrada del aire en el canal superior (K)
	Temperatura de salida del aire en el canal superior (K)
T_{iai}	Temperatura de entrada del aire en el canal inferior (K)
T_{iao}	Temperatura de salida del aire en el canal inferior (K)
\bar{U}_a	Velocidad media del aire en el canal superior e inferior ($m s^{-1}$)

V_w	Velocidad del aire ambiente ($m\ s^{-1}$)
W	Ancho del colector (m)
α_c	Absortividad de la cubierta
α_a	Absortividad de la placa absorbedora
Δ_i	Espesor medio del aislamiento (m)
ϵ_c	Emisividad de la cubierta de vidrio
ϵ_a	Emisividad de la placa absorbedora
ϵ_b	Emisividad de la placa la placa inferior
k_a	Conductividad térmica del aire
σ	Constante de Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
ρ_a	Densidad del aire
τ_c	Transmisividad de la cubierta de vidrio
μ_a	Viscosidad dinámica del aire

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue modelar, simular y caracterizar un secador solar tipo colector-cabina en convección forzada bajo condiciones ambientales del Estado, para estudiar la cinética de secado en capa delgada de productos agrícolas. Primero, se modeló y simuló el comportamiento térmico de dos colectores solares de placa suspendida en convección forzada con diferentes formas de la placa absorbidora y diferentes recubrimientos. Los colectores se analizaron mediante un balance de energía en la cubierta, las placas y el aire, obteniéndose un sistema de ecuaciones simultáneas que se simuló con un programa de computación en MATLAB. Se obtuvo una eficiencia total de 74.5 % y de 70.1 %, por lo que se seleccionó el colector de mayor eficiencia para el secador solar. Además, se estudió la cinética de secado en capa delgada del plátano cuadrado y del taro en condiciones controladas de temperatura a 40, 50, 60 y 70 °C. La velocidad de secado aumentó y el tiempo de secado disminuyó con el aumento de la temperatura. El plátano se secó entre 200 y 300 min y la malanga entre 300 y 550 min aproximadamente. La difusividad de humedad efectiva aumentó en un rango de 1.5425 a $4.3399 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el taro y 3.799 5 a $6.332 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el plátano. La energía de activación fue de 31 050 J mol⁻¹ para el taro y 14 433.9 J mol⁻¹ para el plátano. La razón de humedad se ajustó por regresión no lineal a cinco modelos de secado en capa delgada. Los modelos que describieron adecuadamente el proceso de secado del taro fueron Wang y Singh a 40 °C, Henderson y Pabis a 50 °C y Page a 60 y 70 °C. Los modelos que se ajustaron mejor al proceso de secado del plátano fueron Wang y Singh a 40 y 60 °C, y Page modificado a 50 y 70 °C. Posteriormente, se estudió el efecto de la velocidad del aire de secado sobre la cinética de secado en capa delgada del taro en el secador solar a 0.16, 0.24 y 0.32 m s⁻¹. El modelo de Wang y Singh predijo mejor el proceso a 0.16 y 0.32 m s⁻¹, y el de Henderson y Pabis a 0.24 m s⁻¹. La velocidad de secado aumentó y el tiempo de secado disminuyó al aumentar la velocidad del aire. Finalmente, se estudio la cinética de secado en capa delgada del mango verde a 0.32 m s⁻¹ en el secador solar. El proceso de secado presentó un período de velocidad de secado decreciente con un periodo inicial de velocidad de secado creciente muy corto. El modelo de Page describió mejor la cinética de secado del mango.

ABSTRACT

The main aim in this work was model, simulate and characterize a collector-cabin type solar dryer in forced convection under environmental conditions of the State, to study the thin layer drying kinetics of agricultural products. First, the thermal behavior of two suspended plate solar collectors in forced convection with different shapes of absorber plate and different coatings was modeled and simulated. They were analyzed by an energy balance in glass cover, in the absorber and bottom plates, and in the air obtaining a set of simultaneous equations, which was simulated by a computer program in MATLAB. Results showed a total efficiency of 74.5 % and 70.1 %, then the collector with higher efficiency was selected for the solar dryer. The thin layer dryer kinetics of square plantain and taro were studied under controlled temperature conditions at 40, 50, 60 and 70 ° C. The plantain was dried between 200 and 300 min and the taro between 300 and 550 min. The drying rate increased with increasing drying temperature and the drying time decreased. The Effective moisture diffusivity values increased with increasing drying temperature from 1.5425 to $4.3399 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for taro and $3.7995\text{--}6.3325 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for plantain. The activation energy was $31\,050 \text{ J mol}^{-1}$ for taro and $14\,433.9 \text{ J mol}^{-1}$ for plantain. The experimental moisture ratio was fitted by non-linear regression analysis to five thin layer drying models. The Wang y Singh to 40 °C, Henderson and Pabis to 50 °C and Page to 60 and 70 °C models adequately described the taro drying process. The Wang and Singh to 40 and 60 °C, modified Page to 50 and 70 °C models gave a good fit for the moisture content for plantain. After, the effect of drying air velocity on thin layer drying kinetics of taro in the solar dryer was studied at 0.16, 0.24 y 0.32 m s^{-1} . The Wang and Singh model gave a good fit to 0.16 and 0.32 m s^{-1} , and Henderson and Pabis to 0.24 m s^{-1} . Results indicated that drying rate increased and drying time reduced with increasing drying air velocity. Finally, the thin layer dryer kinetics of unripe mango in the solar dryer was studied at 0.32 m s^{-1} . The drying process took place in the falling rate period with an initial period of very short increasing drying rate. The Page model was selected as the most suitable model to describe the drying kinetics of potato mango.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La energía solar en el Estado de Tabasco es un recurso poco utilizado, aun cuando se cuenta con un recurso solar promedio diario anual de 4.94 kWh m^{-2} [1]. Aunado a esto, debido al tipo de suelo y el régimen pluvial se generan condiciones favorables para el cultivo de diferentes especies frutales, hortalizas y especias. Los principales cultivos que favorecen a la economía regional son: arroz palay, cacao, calabaza, caña de azúcar, copra, hule, hevea, frijol, maíz, limón, mango, naranja, palma africana, papaya, piña, plátano y tomate rojo [2]. Sin embargo, algunos de estos cultivos son de temporada, de corto periodo de cosecha y de naturaleza altamente perecedera. Esto limita severamente su utilización por lo que debe procesarse rápidamente para aumentar su vida útil. Otros productos como coco, cacao, chiles, pimienta se secan al aire libre en patios de cementos bajo la luz solar directa. Éste método tiene la desventaja que depende de las condiciones climáticas, requiere una gran superficie y un largo tiempo de exposición a la luz solar y, en particular, a los rayos ultravioleta. Esto conduce al deterioro del producto seco causando consecuencias económicas adversas. Por lo que el proceso de secado de los productos agrícolas debe llevarse a cabo en un equipo cerrado para mejorar la calidad del producto final. Por otro lado, cuando se genera un exceso de producción se satura el mercado generando pérdidas económicas para los agricultores. Por tal motivo, es necesario buscar alternativas para la conservación de estos productos.

Los secadores solares son una alternativa viable para conservar, comercializar e incorporar valor agregado a un producto, especialmente en lugares con altos niveles de radiación durante la temporada de cosecha. Su diseño simple y su facilidad de manejo hacen que sea una opción ideal en entornos rurales, cerca de donde se produce la cosecha, eliminando la necesidad de transporte o almacenamiento costosos de productos frescos. También crea oportunidades de empleo entre la población rural, especialmente las mujeres.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios para el desarrollo de secadores solares: activos (directos, mixtos e indirectos) y pasivos (directos, mixtos e indirectos) [3-6]. Por ejemplo, López *et al.* [7], calcularon la eficiencia térmica y la eficiencia de secado de tres configuraciones de funcionamiento de un secador híbrido solar-gas en estado

transitorio. Sevik [8] realizó un estudio experimental de un sistema de secado solar híbrido. Secaron diferentes productos agrícolas a distintas velocidades y condiciones climáticas manteniendo una temperatura de 50 °C en el aire de secado. Reyes *et al.* [9] realizaron un estudio experimental de la eficiencia térmica de un secador solar híbrido, compuesto por un colector solar, un calentador eléctrico, un acumulador de energía solar térmica de cera de parafina y una cámara de secado. Amer *et al.* [10], diseñaron y construyeron un secador solar híbrido utilizando la energía solar directa y un intercambiador de calor.

El aspecto más importante de la tecnología de secado es el modelado matemático y la simulación de los procesos y equipos de secado. Su objetivo es encontrar las condiciones de funcionamiento y las dimensiones del equipo adecuadas. El modelado se basa en obtener un conjunto de ecuaciones matemáticas que caractericen adecuadamente el sistema las cuales se puedan resolver por medio de un programa de computación para predecir los parámetros del proceso en función del tiempo.

El modelado y la simulación de la cinética de secado de productos agrícolas a diferentes condiciones son importantes para controlar el proceso de secado y la calidad del producto. Los modelos matemáticos se utilizan para diseñar nuevos sistemas de secado, mejorarlos o incluso para controlar el proceso. Muchos modelos matemáticos se han propuesto para describir el proceso de secado, de los cuales se han utilizado ampliamente los modelos de secado de capa delgada. Estos modelos se pueden categorizar como teóricos, semi-teóricos y empíricos. Muchos investigadores han llevado a cabo modelados matemáticos y estudios experimentales sobre el secado en capa delgada de productos agrícolas. Por ejemplo, ajo [11], oliva [12], cereza dulce [13], yacón [14], plátano [15], mango [16] y soya [17].

Por lo anterior, la posibilidad del secado solar, representa una alternativa viable para la conservación de productos agrícolas en el Estado de Tabasco. Por lo tanto, en el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Modelar, simular y caracterizar un secador solar tipo colector-cabina en convección forzada para estudiar la cinética de secado en capa delgada de taro (*Colocasia esculenta Schott*) y mango (*Mangifera indica Linn*), bajo condiciones ambientales del Estado de Tabasco.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Modelar el comportamiento térmico del secador solar a través de un balance de masa y energía, para obtener las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno.
2. Resolver numéricamente el modelo matemático mediante un programa de computación en MATLAB, para obtener resultados teóricos de temperatura y eficiencia.
3. Construir y caracterizar el secador solar tipo colector-cabina, en convección forzada.
4. Estudiar el comportamiento de la cinética de secado del plátano y el taro utilizando un secador de laboratorio.
5. Estudiar el comportamiento de la cinética de secado del taro y del mango en el secador solar.

1.2. Descripción del contenido

El presente trabajo está compuesto por 5 capítulos. En el Capítulo 1 se da una explicación del problema y se enumeran los objetivos de la investigación. En el Capítulo 2 describen los conceptos de la energía solar dentro y fuera de la tierra y la geometría solar. A continuación se presentan parámetros involucrados en el proceso de secado. Finalmente se exponen una clasificación de los sistemas de secadores solares. En el Capítulo 3, se describen los materiales empleados en el secador, los equipos utilizados para recolectar los datos necesarios y la metodología empleada para realizar la investigación y analizar los resultados obtenidos. En el Capítulo 4 se muestran y discuten los resultados obtenidos en la investigación. En el Capítulo 5 se exponen las conclusiones a las que se llegaron en este trabajo y se dan las recomendaciones para líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. La energía solar

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m y está en promedio a 1.5×10^{11} m de la tierra. Desde el punto de vista físico está constituido por un 70% de hidrógeno y es un enorme reactor nuclear que irradia continuamente una potencia de 3.8×10^{23} kW. De esta cantidad, la Tierra intercepta 1.7×10^{14} kW, siendo el 30 % de la radiación recibida, reflejada al espacio, el 47 % absorbida para mantener la temperatura ambiente y el 23 % restante utilizado para mantener la convección atmosférica y el ciclo hidrológico [18]. A la radiación solar existente antes de entrar en la atmósfera se le denomina radiación solar extraterrestre.

La radiación solar total que incide sobre una superficie normal a los rayos solares situada en el exterior de la atmósfera, I_s , está entre 1322 y 1412 W m^{-2} como consecuencia de las diferentes distancias del Sol a la Tierra en los distintos días del año. Se define la constante solar, I_G , como el valor medio de la radiación solar extraterrestre de 1367 W m^{-2} , obtenido por el World Radiation Center [19].

En función de la constante solar, la radiación solar extraterrestre normal a los rayos solares (Figura 2.1), para un día cualquiera n (1 para el 1 de Enero y 365 para el 31 de Diciembre), viene dada por la ecuación (2.1).

$$I_s = I_G \left(1 + 0.033 \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

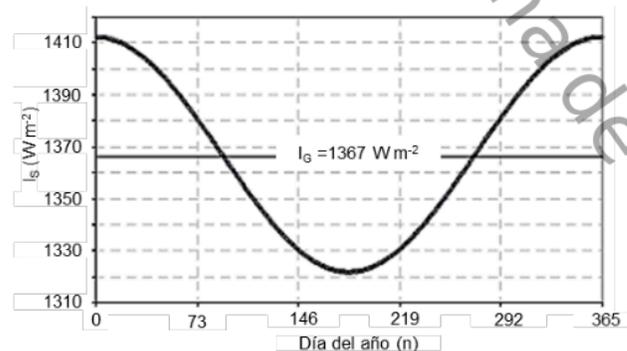


Figura 2.1. Variación de la radiación extraterrestre a lo largo del año

2.1.1. Radiación solar en la superficie terrestre.

La energía solar recibida cada 10 días sobre la Tierra equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas. El 70 % de la población del planeta vive dentro de la denominada "Franja Solar" una zona que recibe la mayor cantidad de energía del sol en el planeta. Esta energía puede aprovecharse de dos formas: foto térmica para producir calor y fotovoltaica para producir energía eléctrica. A su vez la energía solar foto térmica puede ser aprovechada en cocinas solares, secadores solares, destilador, calentador solar, refrigeración por absorción y generación termoeléctrica.

Como consecuencia de las diferentes regiones y composición de la atmósfera, no toda la energía extraterrestre llega a la superficie de la Tierra, modificándose su naturaleza, y sobre todo, su componente direccional [19]. La radiación global, H_G , que incide sobre una superficie inclinada en la Tierra consta de tres componentes (Figura 2.2):

$$H_G = H_B + H_D + H_R \quad (2.2)$$

donde:

H_B es la radiación directa: la que proviene directamente del sol sin sufrir alteraciones, suponiendo ésta el 90% de la radiación global en días muy soleados y prácticamente nulos en días nublados.

H_D es la radiación difusa: la energía dispersada por los componentes atmosféricos.

H_R es la radiación reflejada: también denominada albedo, es la que llega a una superficie inclinada procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo.

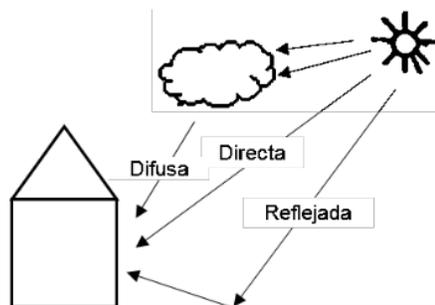


Figura 2.2. Componentes de la radiación solar en una superficie inclinada

Para la medida de la radiación solar existen básicamente dos tipos de elementos [19]: piranómetro y pirheliómetros, ambos basados en la generación de un voltaje proporcional a la radiación solar incidente. El pirheliómetro es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa, por lo que debe disponer de un sistema de seguimiento del Sol para que su superficie receptora sea normal a los rayos solares. El piranómetro se emplea para la medida de la radiación global (directa más difusa) sobre una superficie plana, generalmente horizontal. Si el piranómetro ubicado de forma horizontal posee un dispositivo de bloqueo de la radiación directa del Sol, permite medir exclusivamente la radiación difusa.

2.1.2. Geometría solar

2.1.2.1. Declinación solar

El eje de rotación de la Tierra forma con el eje normal al plano de la elíptica un ángulo constante igual a 23.5° . Debido a esto, el ángulo de los rayos solares con el plano del ecuador, denominado declinación solar δ (Figura 2.3) varía entre 23.45° (solsticio de verano) y -23.45° (solsticio de invierno), expresado mediante la ecuación (2.3) para un día cualquiera del año n .

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.3)$$

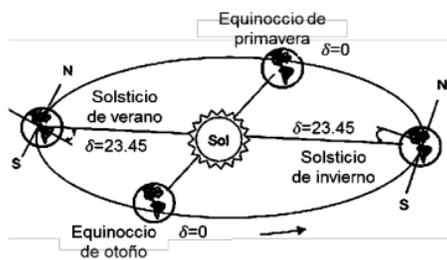


Figura 2.3. Declinación solar

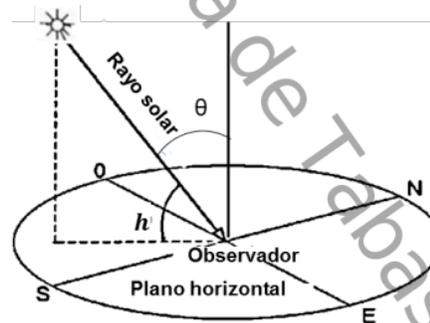


Figura 2.4. Altura solar y ángulo de incidencia

2.1.2.2. Ángulo de incidencia

Se denomina ángulo de incidencia θ (Figura 2.4), sobre una superficie en un punto, al que forma la dirección de la radiación solar directa y la normal en ese punto a la superficie considerada.

2.1.2.3. Altura solar

La altura solar h (Figura 2.4), es el ángulo existente desde el plano del horizonte hasta la posición del sol.

2.1.2.4. Altura de culminación

Se define la altura de culminación, h_c , como la máxima altura diaria, esto es, la que alcanza el Sol al mediodía.

2.1.2.5. Orto y ocaso solar

El número de horas de sol, para cada día del año, se puede determinar a partir de la hora de salida y puesta del sol, siendo éstas de igual valor y de signo contrario ($+\omega_s$ y $-\omega_s$).

2.1.2.6. Ángulo horario

Denotado por ω_h , el ángulo horario es el formado en el ecuador, comprendido entre el plano meridiano de la Tierra que contiene al Sol y el que contiene al observador del lugar.

Considerando que a cada hora le corresponde un ángulo de 15° , siendo igual a cero al mediodía solar, negativo antes del mediodía solar y positivo después del mediodía solar, el ángulo horario se calcula con la ecuación (2.4):

$$\omega_h = 15n_h \quad (2.4)$$

donde n_h es el número de horas antes o después del mediodía solar.

2.2 Proceso de secado

El secado es uno de los métodos primarios más utilizados para la conservación de alimentos. El objetivo es la eliminación de agua hasta el nivel en el que se minimizan

enormemente las alteraciones microbianas y el deterioro [20]. También proporciona una vida útil más larga, un espacio más pequeño para el almacenamiento y un peso más ligero para el transporte [16].

El secado es la operación unitaria de separación mediante la cual se remueve agua o algún otro compuesto volátil por evaporación, de la que se obtiene un producto sólido, y se lleva a cabo para preservar o prologar la vida útil de algunos productos biológicos, entre ellos los alimentos. Este se ve afectado por factores como son: temperatura y velocidad del aire de secado, tipo de producto, espesor del producto, contenido de humedad inicial y final del producto, la temperatura y la difusividad de humedad, movimiento del aire en la cámara de secado [8]. El estudio del proceso de secado de un producto requiere del análisis de los fenómenos de transferencia de calor y masa que simultáneamente tienen lugar. En este proceso, el calor es transferido por convección del aire caliente al producto, aumentando su temperatura, y la temperatura del agua contenida en forma de humedad. La transferencia de masa ocurre cuando la humedad presente emigra en forma de líquido o vapor del interior del producto hacia la superficie y entonces, es transferida al aire en forma de vapor de agua. Para la cuantificación de la influencia de los efectos antes mencionados se puede recurrir a procedimientos experimentales o a la simulación computacional. El desarrollo de modelos matemáticos para describir el proceso de secado ha sido un tema de muchos estudios de investigación [11-17].

2.2.1. Contenido de humedad de un producto

El factor de mayor influencia en la cinética de secado, que afecta en general a la velocidad de secado, es el contenido de humedad del material. La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda o en base seca, e indicada como decimal o porcentaje [21]. El contenido de humedad en base húmeda, definido como la masa del agua presente en el producto por unidad de masa del material sin secar, viene dado por la ecuación (2.5).

$$M_{wb} = \left(\frac{m_o - m_d}{m_o} \right) \quad (2.5)$$

3 De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como la masa del agua presente en el producto por unidad de masa de materia seca, se indica en la ecuación (2.6):

$$M_{db} = \left(\frac{m_o - m_d}{m_d} \right) \quad (2.6)$$

Donde M_{wb} es la humedad en base húmeda (kg agua/kg producto húmedo), M_{db} es la humedad en base seca (kg agua/kg producto seco), m_o es la masa inicial de materia sin secar (kg) y m_d es masa de la materia seca en el producto (kg). El contenido de humedad en base húmeda se utiliza normalmente para fines comerciales, mientras que el contenido de humedad en base seca se emplea para la investigación en ingeniería, porque el cambio de peso asociado con cada punto porcentual de reducción de la humedad en base seca es constante, contrario a la humedad en base húmeda, donde la cantidad de agua involucrada en una reducción de contenido de humedad de uno por ciento cambia conforme el secado progresa, debido a que la masa del agua y la masa total del producto cambian [22].

2.2.2. Actividad de agua y humedad de equilibrio

La actividad de agua es la relación de la presión parcial de vapor de agua del alimento dividida por la presión de vapor del agua pura, ambas medidas a la misma temperatura, su valor varía entre 0 y 1 [23]. 5 La actividad de agua puede ser considerada una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en diferentes reacciones deteriorativas y en el crecimiento de microorganismos. En el equilibrio, la actividad de agua está relacionada con el contenido de humedad de un alimento por medio de una isoterma de sorción. Los productos perecederos frescos tienen una alta actividad de agua, normalmente superior a 0.98; mientras que alimentos secos y estables 5 tienen una actividad de agua inferior a 0.6. Para actividades de agua menores de 0.85 el crecimiento de la mayoría de las bacterias, incluidas las patógenas se inhibe. 5 La contaminación por hongos y levaduras, no obstante, puede ocurrir en un rango de actividad de agua mucho más amplio, pudiendo algunos crecer a actividades de agua tan bajas como 0.60 [23]. 3 El concepto de actividad del agua en un material permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él. Así, un producto

intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta que se establece una situación de equilibrio. En estas condiciones, el valor de la humedad relativa del aire recibe el nombre de actividad de agua del producto, a_w . De esta forma, la humedad relativa de equilibrio del aire en contacto con el agua libre es del 100 % y, por tanto, su actividad de agua es 1. La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y su humedad.

2.2.3. Razón de humedad y velocidad de secado

El proceso de secado se caracteriza por tres periodos [23]:

1. **Velocidad de secado creciente**. Corto periodo transitorio (habitualmente despreciable) en el que se produce un calentamiento inicial del producto y la velocidad de secado aumenta.

2. **Velocidad de secado constante**. El secado tiene lugar sólo en la superficie, produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial. La extracción de humedad en este periodo depende principalmente de las condiciones del aire circundante y prácticamente es independiente de la naturaleza del producto. El movimiento del agua en el material es lo suficientemente rápido como para mantener las condiciones de saturación en la superficie, de manera que durante todo el intervalo el producto se encuentra saturado de humedad a una temperatura prácticamente constante y aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo. El proceso es similar a la evaporación de un líquido.

3. **Velocidad de secado decreciente**. Comienza al finalizar el periodo constante (contenido de humedad crítico del producto). La resistencia interna del material se hace más importante, dificultando el paso de humedad; ya no existen condiciones de saturación en la superficie y se produce la eliminación de la humedad interna. Este periodo depende fundamentalmente de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. A su vez, está dividido en dos periodos [21], un primer periodo decreciente, en el que tiene lugar el secado de la superficie no saturada, y un segundo periodo decreciente en el que la difusión de

humedad a la superficie se hace más lenta y es el factor determinante. En general, la duración de estos regímenes depende del contenido de humedad inicial del material. Para observar estos periodos es conveniente representar la velocidad de secado en función de la razón de humedad.

Los productos agrícolas, en general, presentan solo dos periodos de secado: velocidad de secado constante y velocidad de secado decreciente [24]. Sin embargo, dependiendo del tipo de producto y del proceso de secado, en ocasiones no existe periodo de velocidad de secado constante [16, 25-26]. Por lo tanto, resulta fundamental realizar ensayos experimentales de secado para cada tipo de producto, mediante el registro de peso a diferentes intervalos, para establecer de manera correcta sus curvas de secado.

La razón de humedad en base seca, se expresa generalmente según la ecuación (2.7).

$$MR_{db} = \left(\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \right) \quad (2.7)$$

donde M_t el contenido de humedad en cada instante, M_o el contenido de humedad inicial y M_e el contenido de humedad de equilibrio (kg agua / kg materia seca).

En las aplicaciones de secado en laboratorio, M_e es relativamente pequeño en comparación con M_t y puede despreciarse [14]. En el secado solar M_e se desprecia, ya que la humedad relativa del aire fluctúa continuamente durante el proceso siendo difícil de determinar [27]. De esta manera, la razón de humedad se calcula con la ecuación (2.8).

$$MR = \left(\frac{M_t}{M_o} \right) \quad (2.8)$$

La velocidad de secado DR se calcula usando la siguiente relación:

$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2.9)$$

donde M_t y M_{t+dt} son el contenido de humedad en el tiempo t y $t + dt$, respectivamente y dt es un cambio diferencial del tiempo .

2.2.4. Ajuste de los modelos de secado

Los modelos de secado de capa delgada son herramientas importantes en el modelado matemático para describir el proceso de secado de los materiales biológicos. Se dividen principalmente en tres categorías: teóricas, semiteóricas y empíricas. Los modelos teóricos explican claramente los comportamientos de secado del producto y usan para todas las condiciones del proceso, pero incluyen suposiciones sobre mecanismos de humedad que pueden causar un error considerable. Los modelos semiteóricos generalmente se derivan de la segunda ley de Fick y las modificaciones de sus formas simplificadas. Los modelos empíricos tienen características similares con los modelos semiteórico. Una ecuación teórica proporciona una mejor comprensión de los procesos de transporte, pero una ecuación empírica da un mejor ajuste a los datos experimentales sin ningún conocimiento de los procesos de transporte involucrados. Los modelos semiteóricos de uso común en el secado de capa delgada son: Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, logarítmico, dos términos, Wang y Singh, aproximación de difusión, Henderson y Pabis modificada, Verma *et al.* y dos términos exponenciales.

2.2.5. Difusividad de humedad efectiva

La difusividad de humedad efectiva es un parámetro fundamental en los procesos de secado. Está relacionada con la transferencia de masa y es función del contenido de humedad del material, de la temperatura, así como de la estructura del material.

En el período de velocidad decreciente se usa comúnmente para describir la cinética de secado de los vegetales. En este periodo las características de secado pueden modelarse mediante el uso de la ecuación de difusión de Fick:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) \right) \quad (2.10)$$

donde D_{eff} es la difusividad de humedad efectiva ($m^2 s^{-1}$) y M es el contenido de humedad local (kg / kg de materia seca). La ecuación (2.10) fue resuelta por Crank [28] bajo las siguientes suposiciones: el producto tiene forma de una placa infinita, inicialmente la humedad está distribuida uniformemente, la resistencia a la transferencia de masa en la superficie es despreciable, la transferencia de masa es simétrica con respecto al centro

y es solo por difusión, la contracción es despreciable, el coeficiente de difusión y la temperatura son constantes. Para periodos largos de secado puede expresarse en forma logarítmica lineal con la ecuación (2.11):

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (2.11)$$

donde L es el semi-espesor de las rebanadas (m), t es el tiempo de secado (s) y $m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$ representa la pendiente. La difusividad de humedad efectiva puede determinarse de la pendiente de la ecuación (2.11) y la pendiente obtenida de la gráfica experimental de $\ln(MR)$ contra el tiempo de secado.

2.2.6. Energía de activación

La energía de activación es la cantidad mínima de energía que debe suministrarse para iniciar el proceso de secado. Un valor bajo indica menos energía requerida para eliminar la humedad del producto. La relación de la energía de activación con la difusividad de humedad efectiva y la temperatura puede expresarse por la relación lineal de Arrhenius [29]:

$$\ln D_{eff} = \ln D_o - \frac{E_a}{RT} \quad (2.12)$$

donde D_o es el factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius ($m^2 s^{-1}$), E_a la energía de activación ($J mol^{-1}$), R es la constante de los gases ($8.314 J mol^{-1} K^{-1}$) y T es la temperatura del aire de secado (K).

2.2.7. Isotermas de sorción

Para un valor determinado de la temperatura se puede encontrar para cada producto, experimentalmente, una correspondencia entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de éste. A estas relaciones se las denomina isotermas de sorción del material. Las curvas pueden representarse a partir del estado inicial húmedo del producto (proceso de desorción) o del producto seco (proceso de adsorción). Los puntos de una curva de sorción indican para cada material, a una determinada temperatura, el contenido de humedad en el producto que se encuentra en equilibrio con aire a una

humedad relativa. Las isotermas de sorción son importantes en el análisis del comportamiento en el secado de los materiales. Aportan información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse a fin de conseguir una actividad adecuada para la conservación, almacenamiento, etc, de los productos, y además, permiten conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada. En la Figura 2.5 se muestra el efecto de la temperatura en las isotermas de sorción, de manera que conforme aumenta la temperatura a una determinada humedad relativa, disminuye el contenido de humedad de equilibrio. Varios autores han presentado estas relaciones con la temperatura para diferentes productos [30-32].

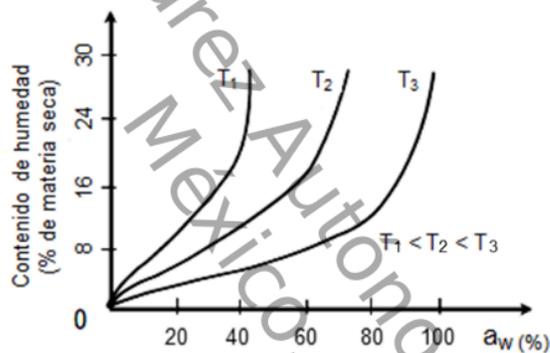


Figura 2.5. Isotermas de sorción de un material

2.2.8. Psicrometría del proceso de secado

Los procesos de secado dependen en gran medida de los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), cuya información se encuentra organizada en las cartas psicrométricas. El secado consta de 2 etapas: en la primera se le añade calor al aire que va a secar el producto; en la segunda el aire caliente entra en contacto directo con el producto a secar, y el vapor de agua se elimina a través del mismo aire. En la Figura 2.6 se muestra el proceso de secado en una carta psicrométrica, donde se presentan cuatro de las siete propiedades termodinámicas del aire. En el eje horizontal se

encuentra la temperatura de bulbo seco, en el eje vertical el contenido de humedad absoluta, en la parte interior las curvas de humedad relativa, y en el inclinado la entalpía.

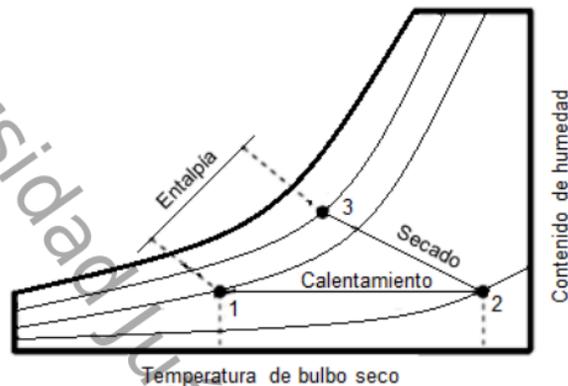


Figura 2.6. Psicometría del proceso de secado

En la primera etapa del secado, el aire se calienta mientras se mantiene constante su contenido de humedad, inicia en el punto 1 y termina en el punto 2. En el punto 1 el aire tiene una temperatura de bulbo seco T_1 , una humedad relativa Φ_1 , y una entalpía h_1 . Al proporcionarle calor al aire sus propiedades se desplazan del punto 1 al punto 2 donde aumenta la temperatura de bulbo seco ($T_2 > T_1$), aumenta su entalpía ($h_2 > h_1$) y disminuye su humedad relativa ($\Phi_2 < \Phi_1$). En la segunda etapa del secado, se seca el producto en un proceso adiabático, inicia en el punto 2 y termina en el punto 3. Al entrar en contacto, el aire caliente con el producto las propiedades del aire se desplazan del punto 2 al punto 3 donde disminuye su temperatura de bulbo seco ($T_3 < T_2$), mantiene constante su entalpía ($h_3 = h_2$) y aumenta su humedad relativa ($\Phi_3 > \Phi_2$). En esta etapa se considera que el calor necesario para evaporar el agua que contiene el producto, es el que proporciona el aire caliente, y que la transferencia de calor por radiación-conducción de los alrededores es cero. El proceso de secado del producto se presenta en la segunda etapa y se realiza en la cámara de secado del secador. En esta etapa hay un decremento en la temperatura del bulbo seco con un aumento en la humedad relativa y la presión del vapor, la entalpía y la temperatura de bulbo húmedo permanecen constantes.

2.3. Secadores solares

Los sistemas de secado, se pueden clasificar de acuerdo al rango de temperatura de operación en secadores de alta y baja temperatura. Los secadores de alta temperatura utilizan combustibles convencionales, mientras que los de baja temperatura utilizan combustibles bio-másicos o energía solar [33]. La energía solar se utiliza ampliamente en aplicaciones de secado ya que requiere de una tecnología simple que se adapta a regiones rurales [34].

Los secadores solares son un medio eficaz de conservación de alimentos ya que el producto está completamente protegido contra la lluvia, el polvo, los insectos y los animales [35]. No solo ahorran energía, sino que también ahorran mucho tiempo, ocupan menos área, mejoran la calidad del producto, hacen que el proceso sea más eficiente y protegen el medioambiente. Además, se pueden utilizar para todo el proceso de secado o para complementar los sistemas de secado artificial, reduciendo así la cantidad total de energía de combustible requerida. Existen una gran variedad de sistemas de secado solar (Figura 2.7).

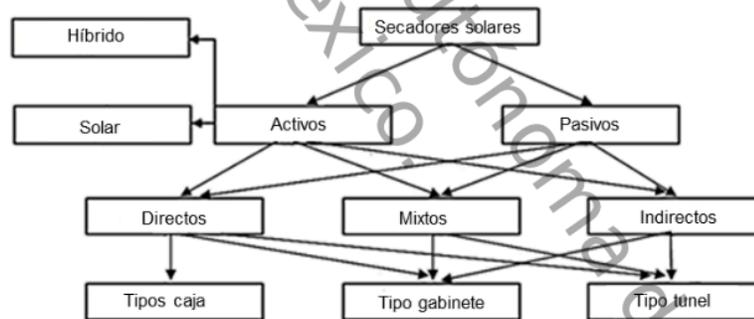


Figura 2.7. Tipos de sistemas de secado solar

Estos se pueden clasificar, según la forma de circulación del aire de secado, en dos grandes grupos: sistemas solares activos o de convección forzada y sistemas solares pasivos o de convección natural [36].

Los sistemas solares activos indirectos o de convección forzada incorporan elementos externos, como ventiladores, para mover el aire caliente utilizado en la extracción de humedad del producto (Figura 2.8a).

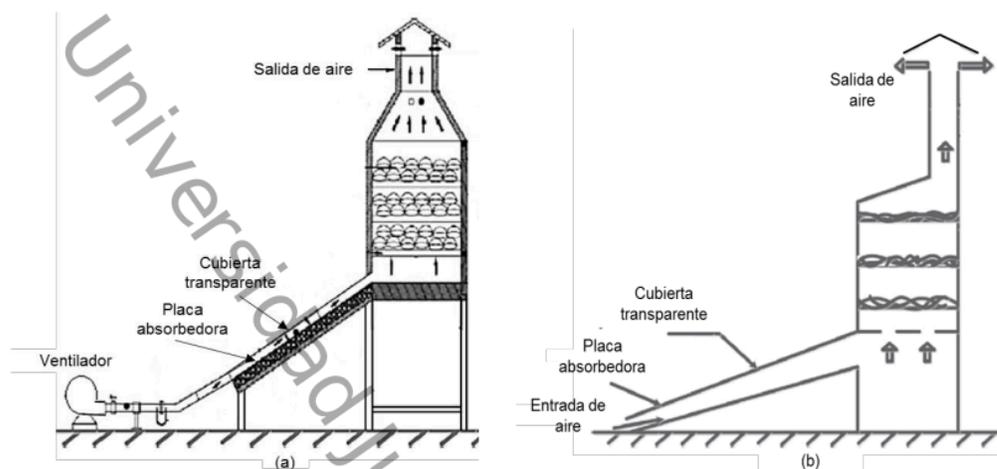


Figura 2.8. Sistemas de secado solar (a) activo, (b) pasivo

Los sistemas solares pasivos o de convección natural no incorporan elementos para forzar la circulación del agente desecante, produciéndose este movimiento por la variación de densidad del mismo provocada por la diferencia de temperaturas (Figura 2.8b).

Dentro de los sistemas solares activos indirectos se encuentran los secadores tipo colector cabina que constan de cuatro elementos principales: un colector solar, una cámara de secado, un ventilador y el conducto entre la cámara y el colector.

El secado solar ha sido utilizado en muchos países que tienen una radiación solar significativa durante todo el año para conservar frutas, verduras, alimentos y otros productos agrícolas [7-10, 37-38]. En los secadores solares, el producto no incluye ningún tipo de conservadores ni otros productos químicos añadidos, y no está expuesto a ningún tipo de radiación electromagnética dañina.

Por otro lado, los modelos de secado en capa delgada describen los fenómenos de secado de forma unida, independientemente de los mecanismos de control. Se han utilizado para estimar los tiempos de secado y para generalizar las curvas de secado de diferentes productos agrícolas [16, 38-41].

11

La evaluación del producto obtenido del secado solar indica que en la mayoría de los casos la retención de las propiedades físicas, sabor y las vitaminas son tan buenas o mejores que las obtenidas con métodos convencionales de secado [10].

2.3.1. Colectores solares

Para mejorar el proceso de secado, es común la utilización de colectores solares, para reducir o eliminar el consumo de combustibles fósiles en el secado de productos agrícolas [42]. Un colector solar (Figura 2.9) es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía solar radiante en calor, consta de una superficie absorbedora pintada de negro que absorbe la radiación solar incidente y la transmite en forma de calor a un fluido de trabajo, siendo éste, para aplicaciones de secado, normalmente aire [19].

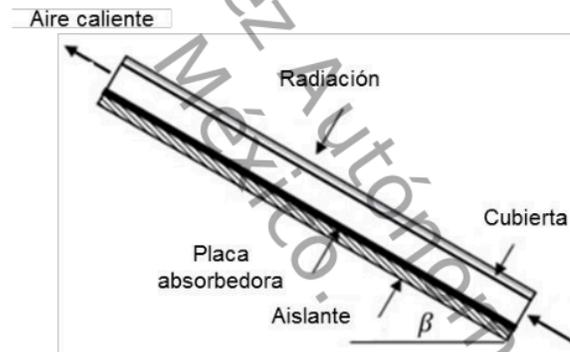


Figura 2.9. Colector solar de aire

Los colectores solares se clasifican en dos grupos: con superficie absorbedora descubierta y con superficie absorbedora cubierta que incorporan una o dos cubiertas (vidrio, plástico, metacrilato, policarbonato, etc.) sobre y paralelamente a la superficie absorbedora Ekechukwu [43]. En general, los colectores solares de una sola cubierta son más efectivos que los de doble o triple cubierta para aplicaciones que implican un aumento de temperatura de entre 10 y 35 °C por encima de la temperatura ambiente [34]. Si se requiere fabricar un colector solar para el secado de productos agrícolas se recomienda que el colector sea con cubierta y de paso frontal con el fin de conseguir una eficiencia máxima Koyuncu [34].

El parámetro más importante para evaluar un colector solar es la eficiencia térmica que depende de los parámetros dimensionales, velocidad de circulación del aire, diseño físico y las condiciones ambientales imperantes. La eficiencia térmica puede incrementarse con el uso de configuraciones tales como placa absorbidora con aletas, placa absorbidora en V, placa absorbidora ondulada, placa absorbidora suspendida (doble paso), con la incorporación de materiales con capacidad de almacenar energía en la placa absorbidora y aplicando a la placa absorbidora un recubrimiento [44-48]. Para una eficiencia óptima Forson *et al.* [49] recomienda que la relación del canal superior del colector solar a la profundidad del canal inferior debe oscilar de 1.0 a 3.5 y la relación de la longitud del colector a la anchura debe estar en el intervalo 1 a 2. Para una eficiencia óptima, la profundidad total del canal de conducción de aire debe ser superior a 0.09 m Macedo y Altemani [50].

En aplicaciones solares-térmicas, un recubrimiento debe tener una alta capacidad de absorción y una baja emisividad para retener la energía térmica atrapada. En aplicaciones de baja temperatura, los recubrimientos selectivos espectrales son una alternativa potencial para superficies absorbedoras ya que permiten que la radiación solar entrante pase a través de ellos y bloquean la emisividad de radiación térmica de longitud de onda más larga [51].

2.3.1.1. Angulo de inclinación de un colector

¹⁴ El ángulo de inclinación de un colector solar es uno de los parámetros que determinan la cantidad de energía solar absorbida, e idealmente debe estar orientada hacia el norte o el sur, dependiendo de la ubicación geográfica y la estación elegida para la experimentación. La inclinación óptima β de un colector con respecto a la horizontal para una latitud dada ϕ , para cada día del año se calcula a través de la ecuación (2.13) [36]:

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.13)$$

donde ϕ representa la latitud de la zona geográfica, δ ángulo de declinación (definida en la sección 2.1.2.1).

El ángulo de declinación puede obtenerse de la ecuación de Cooper [19] para un día cualquiera n:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.14)$$

Para optimizar la captación de radiación se recomienda una orientación del sistema hacia el sur geográfico del lugar y una inclinación, de forma aproximada, igual a la latitud del lugar más diez grados en invierno e igual a la latitud menos diez grados en verano [19]. La mayoría de los investigadores han dado el ángulo de inclinación óptimo como $\beta_{opt} = \phi \pm 15^\circ$ en el hemisferio norte. Mientras que algunos han estimado que, para una disponibilidad máxima anual de energía, la pendiente del colector debe ser igual al ángulo de latitud para los países de baja latitud ($\phi \leq 30^\circ$), aumentando la latitud en 10° para los países de mayor latitud ($\phi > 30^\circ$) [52].

Las dos variables más importantes a conocer son la temperatura del aire a la salida del colector y su eficiencia. La temperatura de salida es una variable imprescindible para el modelado de la cámara de secado, y, la eficiencia del colector resulta importante para evaluar la eficiencia del proceso [53].

El modelado del colector se basa un balance de energía en la cubierta, la placa y el aire [19], Las hipótesis bajo las cuales se realiza el modelado son: el régimen es estacionario, el caudal de aire que entra en el colector es constante y conocido, las temperaturas del fluido y de la superficie absorbadora son temperaturas medias.

2.3.1.2. Producto Transmisividad-absortividad

El producto $(\tau\alpha)$ tiene tal importancia que conviene verlo como una propiedad en sí del conjunto cubierta-superficie absorbadora, más que como el producto de dos propiedades [19]. Este producto es el resultado de las sucesivas reflexiones que se producen entre la placa absorbadora y la cubierta translúcida. Así, si τ es la transmisividad del recubrimiento en un determinado ángulo de incidencia y α es la absortividad angular de la superficie absorbadora, de toda la energía incidente, $(\tau\alpha)$ es absorbida por la placa y $(1 - \alpha)\tau$ es reflejado hacia la cubierta, siendo de esta última la cantidad $\tau(1 - \alpha)\rho_d$ reflejada de nuevo hacia la superficie absorbadora (ρ_d es la reflectividad para radiación difusa de la cubierta). Este fenómeno se repite indefinidamente, de forma que la fracción de la energía incidente que es finalmente absorbida, resulta:

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (2.15)$$

De forma general, la radiación S, absorbida por la placa está dada por la ecuación:

$$S = I(\tau\alpha) \quad (2.16)$$

Debido al calentamiento de la cubierta se reducen las pérdidas térmicas a través de la misma. Para tener en cuenta este hecho, es habitual utilizar el producto transmisividad-absortividad efectivo, llamado $(\tau\alpha)_e$, el cual es ligeramente superior al producto $(\tau\alpha)$. Pese a existir fórmulas para el cálculo del producto $(\tau\alpha)_e$ [19], rara vez éste es mayor que el 1 ó 2% de $(\tau\alpha)$. De esta forma, se toma para los materiales habituales de cubiertas la ecuación:

$$(\tau\alpha)_e = 1.02\tau\alpha \quad (2.17)$$

2.3.2. Cámara de secado

La cámara de secado es el elemento que recibe el aire precalentado del colector y en la que se produce el secado de los productos. En forma general, el establecimiento de las ecuaciones balances de masa y energía, junto con un modelo empírico que represente la cinética del proceso, permite la simulación de la operación y mejora de las diferentes configuraciones de secado térmico. De las diferentes formas posibles de cámaras de secado [54], para este trabajo será tipo cabina. Forson y colaboradores [55] recomienda una relación del área de la superficie de secado en la cabina al área de la superficie del colector ≤ 1.0 .

2.4. Producto a secar

2.4.1. Plátano

El plátano puede tener altura de 7-9 m, pertenece a la familia Musaceae, es originaria del sureste de Asia y se cosecha también en África, India y América Latina. La producción mundial anual representa alrededor de 145 millones de toneladas (106 millones de plátano y 39 millones de banana FAOSTAT [56]. México se encuentra en el lugar número 10 de los productores de plátano a nivel mundial con un total de producción de 2 384 778

toneladas FAOSTAT [56]. Los principales estados productores de plátano en México son Chiapas, Tabasco, Veracruz, Colima y Jalisco, [57]. El plátano verde tiene más almidón que el plátano maduro y la pulpa seca contiene entre 70 y 80 % de almidón que consiste en amilosa y amilopectina, con un contenido de amilosa mayor que almidones de fuentes como patata, maíz y trigo [58]. Es adecuado para producir harina, reducir el índice glucémico, controlar la diabetes y prevenir el cáncer de colon [59]. El almidón del plátano cuadrado tiene aplicaciones en alimentos procesados a altas temperatura, como jaleas, salchichas, pan y enlatados [60]. Su disposición durante todo el año y bajo costo de transformación en harina, permiten que el plátano pueda utilizarse como sustituto de la harina de trigo.

Las pérdidas del plátano pueden alcanzar 40 % de la producción total debido al manejo inadecuado después de la cosecha. Esfuerzos e investigaciones se están realizando para mitigar las pérdidas del plátano mediante el uso posterior a la cosecha y procesamiento del fruto [61].

2.4.2. Taro

El taro es un producto de alta calidad cultivado en muchos países tropicales del mundo. Se considera una buena fuente de carbohidratos con una cantidad considerable de almidón (70-80 g / 100 g de taro seco). La calidad del almidón es significativamente superior en comparación con el maíz y el trigo debido a sus tamaños granulares muy pequeños que varían de 1 a 5 μ m. La combinación de almidón de gránulos pequeños y contenido de fibra dietética altamente soluble la hace altamente digerible y se usa en la preparación de dietas de destete para bebés y alimentos de bajo índice glucémico [39].

¹ En México, su cultivo ha aumentado pero su uso ha sido limitado debido a su corta vida poscosecha por su alto contenido de humedad [62]. Es fuente de calcio, fósforo, potasio, hierro, zinc, vitamina C, tiamina, riboflavina y niacina, que son componentes importantes de la dieta humana [63]. ¹ Además, contiene altas cantidades de almidón (70-80 g/100 g) [64], es altamente digerible [65] y es rico en mucilagos (gomas hasta 9.1%) [66]. Los cormos de taro frescos son altamente perecederos principalmente como resultado de su alto contenido de humedad (65-80% wb). Para minimizar las pérdidas, deben convertirse

de perecederos a no perecederos mediante operaciones de procesamiento de alimentos [20]. Varios investigadores [67-69] han reportada la conversión del taro en harina, que es un producto más estable, aceptable y valioso. La harina de taro se ha utilizado por diferentes investigadores para alimentos procesados como pan [68-69], galletas [70], tortas [71], fideos [72] etc. Se estima que en promedio el 30 % de este producto se pierde durante el almacenamiento [20].

2.4.3. Mango

El mango es uno de los frutos tropicales y subtropicales de gran importancia tanto desde el punto de vista económico como nutricional. Se considera una buena fuente de carbohidratos, vitamina C y muy rica fuente de pro-vitamina A. El mango se compone principalmente de agua (> 80%) y carbohidratos, con un pequeño contenido de proteínas y grasas. El carbohidrato predominante en el mango verde es el almidón, que en la fruta madura es reemplazado en gran parte por azúcares como sacarosa, glucosa y fructosa. Debido a sus propiedades morfológicas, fisicoquímicas y funcionales, los almidones de mango podrían ser una fuente de almidón factible con propiedades adecuadas para su uso en la industria alimentaria [73]. A pesar de su excelencia, la naturaleza perecedera de esta fruta y su corta temporada de cosecha limitan severamente su utilización. El secado es un método para prevenir el deterioro de la fruta fresca. Akoy [16], investigó las características del secado de rebanadas de mango maduro en un secador de laboratorio en convección forzada a diferentes temperaturas de secado (60, 70 y 80 ° C), a una velocidad del aire de 0.5 m / s y un espesor constante de la muestra de 0.3 cm. Mahayothee *et al.* [74] evaluaron la influencia de la madurez de la fruta en las propiedades sensitivas y en los contenidos de trans-β-caroteno de rebanadas de mango secadas en un secador de bandeja convencional a 70 °C, hasta que la actividad de agua de los frutos secos estuvo por debajo 0.65.

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Análisis del colector solar

En esta sección, se modeló el comportamiento térmico de dos colectores solares de placa suspendida para calentamiento de aire en convección forzada. El principio de modelado se basó en un conjunto de ecuaciones matemáticas que caracterizan adecuadamente el sistema [75]. Con el fin de mejorar la eficiencia, en el primer colector se utilizó una placa absorbidora plana cuya parte superior se pintó con un recubrimiento selectivo de níquel negro nanoestructurado de baja emisividad desarrollado por Lizama *et al.* [76]. En el segundo colector, se empleó una placa absorbidora ondulada con el lado superior de la placa pintada con pintura comercial, el cual de estudios previos realizados por Zhao y Li [77], sin el uso de recubrimientos en ambos colectores, es de 11-14% más eficiente que el colector solar de placa plana.

3.1.1. Dimensionamiento de los colectores solares

Con base en las recomendaciones hechas en la sección 2.3.1 se dimensionaron las diferentes partes de los colectores. Estas dimensiones para ambos colectores son las siguientes: 1 m de longitud, 0.7 m de ancho, 0.05 m de profundidad del canal superior, 0.5 m de profundidad del canal inferior. El fondo y los costados de ambos colectores se consideran de panel de poliuretano con espesor de 0.0381 m (1.5 pulgada) revestidos con lámina de acero galvanizado. Se utilizó una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor.

3.1.2. Análisis teórico

El esquema de los colectores solares propuestos se muestra en las Figura 3.1 y 3.2. La placa suspendida divide el colector en dos canales que permiten que el aire circule por ambas caras de la placa absorbidora, aumentando la superficie de transferencia de calor y por lo tanto la eficiencia.

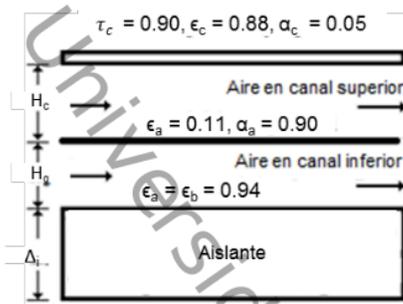


Figura 3.1. Colector solar de placas planas con recubrimiento selectivo.

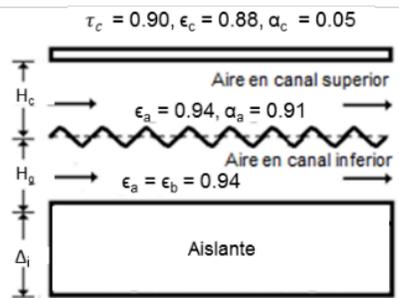


Figura 3.2. Colector solar de placas onduladas con recubrimiento comercial negro mate.

3.1.3 Consideraciones del análisis

- Hay una caída insignificante de temperatura a través de la cubierta de cristal, la placa absorbedora y la placa inferior.
- Hay un flujo de calor unidimensional a través del aislamiento, que es en la dirección perpendicular al flujo de aire.
- El cielo puede ser considerado como un cuerpo negro para radiación de longitud de onda larga a una temperatura equivalente del cielo.
- Las pérdidas a través de la cubierta son al aire a temperatura ambiente.
- El polvo, la suciedad y el sombreado de la placa absorbedora son insignificantes.
- La inercia térmica de los componentes del colector es insignificante.
- Las temperaturas de funcionamiento de los componentes se suponen uniforme.
- Para un colector corto, la temperatura del aire varía linealmente en la dirección del flujo.
- Los canales de aire se suponen libres de fugas.
- Las pérdidas térmicas a través del aislamiento inferior del colector se deben principalmente a la conducción a través del aislamiento, los causados por el viento y la radiación térmica del aislamiento se supone despreciable.
- La superficie de la placa absorbedora y la cubierta de vidrio son iguales.

El análisis del colector solar se basó en los estudios realizados por J. Duffie and Beckman [19], que por medio de un balance de energía en la cubierta, las placas y el aire se obtuvo

un sistema de ecuaciones lineales. Para un colector corto, las temperaturas de las paredes que rodean el aire son uniformes y las temperaturas del aire varían linealmente a lo largo del colector [78], por lo que las temperaturas medias del aire en el canal superior e inferior pueden expresarse como:

$$T_{ua} = (T_{uai} + T_{uao})/2 \quad (3.1)$$

$$T_{la} = (T_{lai} + T_{lao})/2 \quad (3.2)$$

Las ecuaciones del balance de energía para la cubierta de vidrio, la placa absorbedora y la placa inferior respectivamente, están dadas por las ecuaciones:

$$\alpha_c I + h_{c,uac}(T_{ua} - T_c) + h_{r,ac}(T_a - T_c) = h_{cw}(T_c - T_{am}) + h_{r,cs}(T_c - T_s) \quad (3.3)$$

$$\tau_c \alpha_a I = h_{c,uaa}(T_a - T_{ua}) + h_{r,ac}(T_a - T_c) + h_{r,ab}(T_a - T_b) + h_{c,laa}(T_a - T_{la}) \quad (3.4)$$

$$h_{r,ab}(T_a - T_b) + h_{c,lab}(T_{la} - T_b) = h_{ci}(T_b - T_{am}) \quad (3.5)$$

Las ecuaciones del balance de energía para el aire en el canal superior e inferior son respectivamente

$$h_{c,uaa}(T_a - T_{ua}) = \frac{2C_{pa}m_a(T_{ua} - T_{uai})}{Ac} + h_{c,uac}(T_{ua} - T_c) \quad (3.6)$$

$$h_{c,laa}(T_a - T_{la}) = \frac{2C_{pa}m_a(T_{la} - T_{lai})}{Ac} + h_{c,lab}(T_{la} - T_b) \quad (3.7)$$

Reordenando las ecuaciones anteriores, se obtienen el siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_c = \frac{\alpha_c I + h_{c,uac}T_{ua} + h_{r,ac}T_a + h_{cw}T_{am} + h_{r,cs}T_s}{h_{c,uac} + h_{r,ac} + h_{cw} + h_{r,cs}} \quad (3.8)$$

$$T_a = \frac{\tau_c \alpha_a I + h_{c,uaa}T_{ua} + h_{r,ac}T_c + h_{r,ab}T_b + h_{c,laa}T_{la}}{h_{c,uaa} + h_{r,ac} + h_{r,ab} + h_{c,laa}} \quad (3.9)$$

$$T_{ua} = \frac{h_{c,uaa}T_a + h_{c,uac}T_c + 2C_{pa}m_aT_{uai}/Ac}{h_{c,uac} + h_{c,uaa} + 2C_{pa}m_a/Ac} \quad (3.10)$$

$$T_{la} = \frac{h_{c,laa}T_a + h_{c,lab}T_b + 2C_{pa}m_aT_{lai}/Ac}{h_{c,laa} + h_{c,lab} + 2C_{pa}m_a/Ac} \quad (3.11)$$

$$T_b = \frac{h_{ci}T_{am} + h_{r,ab}T_a + h_{c,lab}T_{la}}{h_{ci} + h_{r,ab} + h_{c,lab}} \quad (3.12)$$

De acuerdo con W. Gao *et. al.* [47] la eficiencia instantánea de un colector solar es

$$\eta = \frac{Q_{ua} + Q_{la}}{IAC} = \frac{c_{pa}m_a}{IAC} [(T_{uao} - T_{uai}) + (T_{lao} - T_{lai})] \quad (3.13)$$

$$\text{Donde el calor útil total es: } Q_a = Q_{ua} + Q_{la} \quad (3.13a)$$

y la eficiencia total del colector se calcula con la siguiente ecuación [44]:

$$\eta_t = \frac{\Sigma(Q_{ua} + Q_{la})}{Ac \Sigma I} \quad (3.14)$$

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por radiación, coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta de vidrio al viento, la temperatura del cielo y el coeficiente de transferencia de calor por conducción a través del aislamiento inferior se utilizaron las siguientes relaciones recomendadas por diversos investigadores [75, 79-81]:

$$h_{cw} = 2.8 + 3.3V_w \quad (3.15)$$

$$V_w = 1.5 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

$$h_{r,cs} = \sigma \epsilon_c (T_c - T_s) (T_c^2 + T_s^2) \frac{(T_c - T_s)}{(T_c - T_{am})} \quad (3.17)$$

$$T_s = 0.0552 T_{am}^{1.5}$$

$$h_{r,ac} = \frac{\sigma (T_a^2 + T_c^2) (T_a + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (3.18)$$

$$h_{r,ab} = \frac{\sigma (T_a^2 + T_b^2) (T_a + T_b)}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1} \quad (3.19)$$

$$h_{ci} = \frac{k_i}{\Delta_i} \quad (3.20)$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección se calcularon con

$$h_{c,uaa} = h_{c,uac} = h_{c,laa} = h_{c,lab} = Nu \frac{k}{D_h} \quad (3.21)$$

$$\text{donde } D_h = 2WH_g / (W + H_g) \quad (3.22)$$

Para el primer colector, los números de Nusselt fueron calculados por la relación dada por [47]

$$Nu_{uaa} = Nu_{laa} = Nu_{uac} = Nu_{lab} = 0.0158 Re^{0.8} \quad (23)$$

Y el número de Reynolds se calculó con

$$Re = \frac{2\rho_a \bar{U}_a H_c}{\mu_a} \quad (3.24)$$

En el segundo colector, el número de Nusselt para la cubierta se calculó de forma similar que para el primer colector.

Para la placa absorbidora e inferior los números de Nusselt fueron calculados por la relación dada en [47]:

$$Nu_{uaa} = Nu_{laa} = Nu_{lab} = 0.0743 Re^{0.76} \quad (3.26)$$

Para este caso el número de Reynolds se calculó con

$$Re = \frac{\rho_a \bar{U}_a D_h}{\mu_a} \quad (3.27)$$

Para $280 < T < 470$ K la densidad, conductividad térmica y viscosidad dinámica del aire en el canal superior e inferior fueron determinadas por las siguientes relaciones empíricas [82]:

$$\rho_a = 3.9147 - 0.016082T + 2.9013 \times 10^{-5} T^2 - 1.9407 \times 10^{-8} T^3 \quad (3.28)$$

$$k_a = (0.0015215 + 0.097459T - 3.3322 \times 10^{-5} T^2) \times 10^{-3} \quad (3.29)$$

$$\mu_a = (1.6157 + 0.06523T - 3.0297 \times 10^{-5} T^2) \times 10^{-6} \quad (3.30)$$

donde para el canal superior $T = T_{ua}$ y para el canal inferior $T = T_{la}$

La longitud de cada colector se dividió en 10 partes iguales resultando 10 colectores de iguales dimensiones. Debido a que algunos coeficientes de transferencia de calor son funciones de la temperatura, el sistema de ecuaciones del colector, se resolvió por un método iterativo mediante un programa de computación elaborado en lenguaje de MATLAB, considerando constante la radiación en periodos de 15 minutos. Este método consistió en calcular los coeficientes de transferencia de calor suponiendo para el primer colector valores iniciales de T_c , T_{ua} , T_a , T_{la} y T_b iguales a la temperatura ambiente. Los valores de los coeficientes calculados se utilizan para estimar las nuevas temperaturas. Si las nuevas temperaturas resultan mayor al 0.01% de sus valores supuestos inicialmente entonces estos nuevos valores se utilizan para la siguiente iteración. El proceso se repite hasta que los nuevos valores de temperaturas obtenidos están dentro de $\pm 0.01\%$ de sus respectivos valores anteriores. El siguiente colector, se añadió al final del primer colector considerando las temperaturas iniciales medias de las paredes iguales a las temperaturas medias de las paredes del primer colector, y las temperaturas de entrada del aire del segundo colector iguales a las temperaturas de salida del aire del primer colector y así sucesivamente hasta considerar los 10 colectores. Mediante este proceso, se obtuvieron las temperaturas de los componentes del colector para los primeros 15 minutos. Las temperaturas obtenidas en los primeros quince minutos de iteración en la cubierta, la placa absorbadora, la placa de fondo; y la temperatura ambiente medida en los siguientes 15 minutos, fueron las temperaturas de entrada para los siguientes 15 minutos, y así sucesivamente hasta considerar el total de las mediciones.

Algunos investigadores han estimado que, para una disponibilidad máxima anual de energía, la pendiente del colector debe ser igual al ángulo de latitud para los países de baja latitud ($\beta \leq 30^\circ$), aumentando la latitud en 10° para los países de mayor latitud ($\beta > 30^\circ$) [52]. Por lo anterior, se consideró una inclinación del colector de 18° (latitud de Cunduacán, Tabasco) y orientado directamente hacia el sur.

3.2. Cinética de secado en capa delgada de plátano cuadrado y taro en condiciones controladas

3.2.1. Configuración experimental.

El secador utilizado consiste de una cámara de secado, una bandeja, un calentador eléctrico y un ventilador (Figura 3.3). La cámara se construyó de acrílico de 0.05 m espesor aislado con poliuretano expandido. Las dimensiones de la cámara son 0.55 m de ancho, 0.4 m de profundidad y 0.4 m de altura. En la parte superior de la cámara se colocó un ventilador centrífugo Steren VN6A-012P de 100 W a 12 V. El ventilador se conectó a una fuente de alimentación de corriente directa GW INSTEK PSW 250-13.5. En el interior de la cámara se colocó una bandeja de madera con malla de alambre galvanizado de 0.50 m de ancho y 0.35 m de profundidad. En la parte inferior se instaló una resistencia eléctrica de alambre nicromel y se conectó a un regulador de voltaje para calentar el aire a la temperatura deseada.

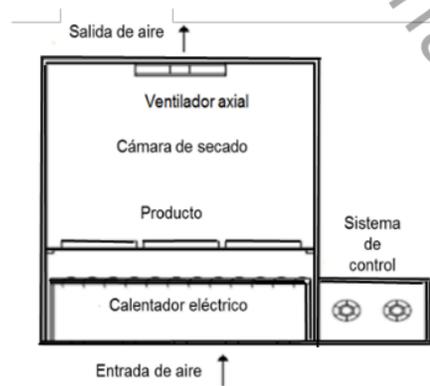


Figura 3.3. Esquema del secador de laboratorio

3.2.2. Procedimiento experimental

En este estudio se utilizó plátano cuadrado y taro morado cosechados en el municipio de Cunduacán, Tabasco, México (18.04° N y 93.18° O). Para el estudio se seleccionaron muestras de tamaño uniforme y se lavaron, pelaron y cortaron en rodajas de 0.5 cm de espesor. La humedad inicial en base húmeda para el plátano fue de 0.70 (2.33 en base seca) y para el taro de 0.69 (2.22 en base seca), y se determinó conforme a la norma NMX-F-083 [83], utilizando un horno de secado Ecoshel 9023A y una balanza analítica 0.0001g de precisión. Para cada experimento se pesó 0.5 kg del producto en una balanza analítica Shimadzu aux 320 y se colocó en la bandeja del secador en un arreglo en capa delgada. La masa se midió cada 10 min en una balanza digital electrónica Torrey L-EQ hasta que alcanzó una masa constante. La velocidad del aire se ajustó a 0.36 m s⁻¹ y el aire se calentó a 40, 50, 60 y 70 °C. La humedad relativa del aire ambiente se controló en un rango de 48 a 50 % con un deshumidificador Fantech modelo Pro 250. La temperatura ambiente medida cada 10 minutos con un medidor de humedad Extech RH101 se mantuvo en un rango de 24 a 26 °C.

3.2.3. Razón de humedad y velocidad de secado

Los datos experimentales de secado se analizaron gráficamente en términos de la razón de humedad (MR) contra el tiempo de secado [40]. La razón de humedad, MR, se calculó con la siguiente ecuación (sección 2.2.3):

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (3.31)$$

donde M_t y M_o son el contenido de humedad en base seca en el tiempo t (kg agua/kg materia seca) y el contenido inicial de humedad en base seca, respectivamente.

El contenido de humedad en base seca del producto se calculó mediante la ecuación:

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_d} \quad (3.32)$$

donde m_i es la masa inicial y m_d es la masa del producto seco.

La velocidad de secado DR se calculó usando la siguiente relación:

$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3.33)$$

donde M_t y M_{t+dt} son el contenido de humedad en el tiempo t y $t + dt$, respectivamente y dt es un cambio diferencial del tiempo.

3.2.4. Ajuste de las curvas de secado

La razón de humedad experimental contra el tiempo de secado para cada temperatura, se ajustó por regresión no lineal a cinco modelos de secado en capa delgada (Tabla 3.1). Para todos los modelos se determinaron los valores del coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrado medio (RMSE).

Tabla 3.1. Modelos matemáticos utilizados para predecir la cinética de secado

Taghian-Dinani *et al.* [85]

Nombre del modelo	Ecuación del modelo
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^n$
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

Los ajustes de cada modelo se evaluaron en función del coeficiente de correlación o coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo con el valor más alto de R^2 y el valor más bajos RMSE se seleccionó como el modelo que mejor representa el proceso de secado. Si los valores de R^2 son superiores a 0.95 y los valores de RMSE son inferiores a 0.06 se considera un buen ajuste [13, 84].

3.2.5. Difusividad de humedad efectiva y energía de activación

Con el valor de la pendiente obtenida de la gráfica experimental de $\ln(MR)$ contra el tiempo de secado y la pendiente de la ecuación (2.11) se calculó la difusividad de humedad efectiva (ecuación 3.35).

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (3.34)$$

donde m representa la pendiente de la recta de la ecuación (2.11), L es el semiespesor de las rebanadas (m) y D_{eff} es la difusividad de humedad efectiva ($m^2 s^{-1}$).

Para calcular la energía de activación se graficaron los datos experimentales de $\ln(D_{eff})$ contra el inverso de la temperatura, y esta se ajustó por regresión lineal a una línea recta.

Con el valor de la pendiente de la recta experimental de $\ln(D_{\text{eff}})$ ajustada y la pendiente de la ecuación (2.12) se calculó la energía de activación, (ecuación 3.35).

$$m = \frac{E_a}{R} \quad (3.35)$$

3.3. Cinética de secado en capa delgada de taro y de mango verde tommy en el secador solar

3.3.1. Procedimiento experimental.

En el estudio se utilizó la variedad de Taro morado y mango verde Tommy recién cosechada en el municipio de Cunduacán, Tabasco, México (18.04° N y 93.18° O) en Mayo del 2017. Se seleccionaron frutos de tamaño uniforme y se lavaron, pelaron y cortaron en rodajas de 0.5 cm de espesor. La humedad inicial se determinó conforme a la norma NMX-F-083 [83], utilizando un horno de secado Ecoshel 9023A y una balanza analítica 0.0001g de precisión. El contenido de humedad inicial en base humedad promedio fue de 0.68 (2.12 en base seca) para el taro y de 0.84 (5.02 en base seca) para el mango. En cada experimento se pesó 1.0 kg de producto en una balanza analítica Shimadzu aux 320 y se colocó en la bandeja en un arreglo en capa delgada. Los experimentos de secado se realizaron del 19 al 24 de mayo del 2017 en Cunduacán, Tabasco de las 8:30 a las 16:30 h. El peso del producto en el proceso de secado se registró cada 15 min con una balanza digital electrónica Torrey L-EQ y se detuvo hasta que alcanzó un peso constante. La temperatura ambiente y la humedad relativa del ambiente se midieron con un Hygro-Thermometro Extech RH101. La temperatura en la cámara se midió con termopar tipo J. La radiación solar incidente a una inclinación de 18° se midió con un piranómetro Hukseflux LP02. El termopar y el piranómetro se conectaron a una tarjeta de adquisición de datos ADAMS-4016 para registrar la radiación solar cada 15 min. La velocidad del ventilador se midió con un anemómetro Extech 45118 y se ajustó variando el voltaje en la fuente hasta alcanzar las velocidades del aire de secado en la cámara de 0.16, 0.24 y 0.32 m s⁻¹. De la sección 4.1, se consideró una inclinación del colector de 18° (latitud de Cunduacán, Tabasco) y orientado directamente hacia el sur

3.3.2. Razón de humedad y velocidad de secado

La razón de humedad y velocidad de secado se calcularon con las ecuaciones (3.31 y 3.33) de la sección 3.2.3, considerando que la humedad relativa fluctuó continuamente con el tiempo durante el proceso.

3.3.3. Ajuste de los modelos de secado

La razón de humedad experimental contra el tiempo de secado para cada temperatura, se ajustó por regresión no lineal a los cinco modelos de secado en capa delgada mostrados en la Tabla 3.1 de la sección 3.2.4. Los ajustes de cada modelo se evaluaron en función del coeficiente de correlación o coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) [13, 84].

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del colector solar

La temperatura ambiente y la radiación solar a una inclinación de 18° medidos cada 15 minutos correspondientes al día 26 de mayo 2016 desde la 8:30 hasta las 16:30 horas se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2. Los valores máximos de la radiación solar y la temperatura ambiente fueron 960 W m^{-2} a las 13:15 h y 315 K a las 15:00 h, respectivamente.

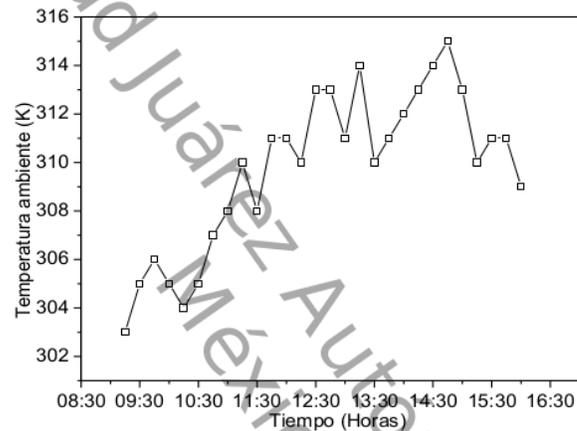


Figura 4.1 Variación de la temperatura ambiente el 26 de mayo del 2016

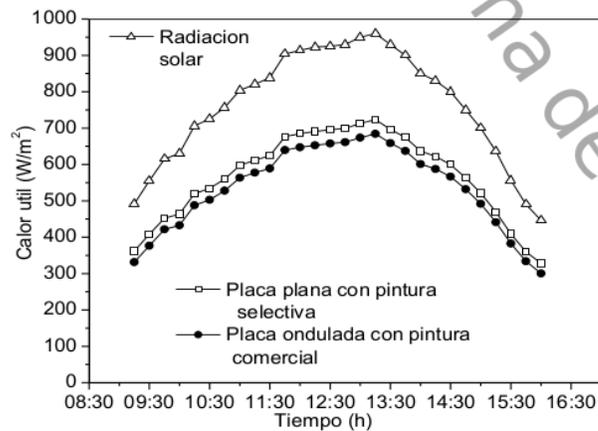


Figura 4.2. Variación de la radiación solar y el calor útil el 26 de mayo del 2016

En la figura 4.2 también se muestra el calor útil calculado con la ecuación (3.13a) a lo largo del día en ambos colectores solares para un flujo másico de 0.09 kg s^{-1} . Como se observa el calor útil en el colector de placa plana está por encima del colector de placa ondulada en un rango de 30 a 40 W m^{-2} . En la Figura 4.4 se muestra la eficiencia instantánea calculada con la ecuación (3.13) para las diferentes intensidades de la radiación solar a lo largo del día. En el primer colector la eficiencia varió en el rango de 73.5 a 75.5 % y en el segundo de 67.5 a 71.5 % aproximadamente, siendo superior en el primer colector, con un valor mínimo de 4.0 % a las 13:15 horas y un valor máximo de 6.0 % a las 9:15 y 15:45. La eficiencia total calculada con la ecuación (3.14) fue de 74.5 % para el primer colector y de 70.1 % para el segundo colector. Al respecto Gao *et al.* [47] mostraron que para un mismo flujo de aire y sin recubrimiento en la placa absorbadora, el calor útil en un colector de placa ondulada es 11% mayor que en un colector de placa plana, debido a que la forma ondulada aumentó el área de captación de radiación solar de la placa absorbadora, y simultáneamente generó mayor turbulencia en el aire incrementando los coeficientes de transferencia de calor por convección entre el aire y la placa el interior de los canales. El-Sebaili *et al.* [45] investigaron teórica y experimentalmente dos colectores solares, uno de placa plana y otro de placa en V ambas suspendidas y demostraron que el colector solar de placa en V fue 11-14 % más eficiente que el colector solar de placa plana. Abbas [86] realizó una evaluación experimental en tres tipos de colectores solares con recubrimientos. Los resultados revelaron que los recubrimientos aumentaron la eficiencia en más del 30 %. Gao *et al.* [47] aplicaron recubrimiento selectivo en la cubierta, la placa absorbadora y en la placa del fondo a dos colectores solares, uno con placa plana y otro con placa ondulada. Reportaron valores de 68% en el colector de placa plana y de 73% en el colector de placa ondulada. Ong [78] reportó una eficiencia de 66 % para un colector con placa absorbadora plana suspendida con recubrimiento negro comercial. En todos estos casos, se observó que la eficiencia fue menor en el colector de placa plana. Sin embargo en este estudio la eficiencia en el colector de placa plana resultó por encima del colector de placa ondulada. La diferencia en los resultados indica que en este caso específico, el recubrimiento selectivo mejoró significativamente la eficiencia en el colector de placa plana por encima del colector de placa ondulada al reducir las pérdidas de calor por

radiación de la placa absorbedora hacia la cubierta de vidrio. Esta mejora se debió a la gran diferencia entre los coeficientes de transferencia de calor por radiación entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio debido a la baja emisividad del recubrimiento selectivo (Figura 4.3). Resultado similar, fue observado por Gao *et. al.* [47] en un estudio realizado a un colector de placa plana. El calor útil siguió la tendencia de la radiación solar, aumentando gradualmente hasta alcanzar un valor máximo de 720 W m^{-2} en el colector con placa plana y de 680 W m^{-2} en el colector de placa ondulada, luego disminuye conforme disminuye la radiación solar, lo que concuerda que estudios previos para diferentes colectores solares [44-46].

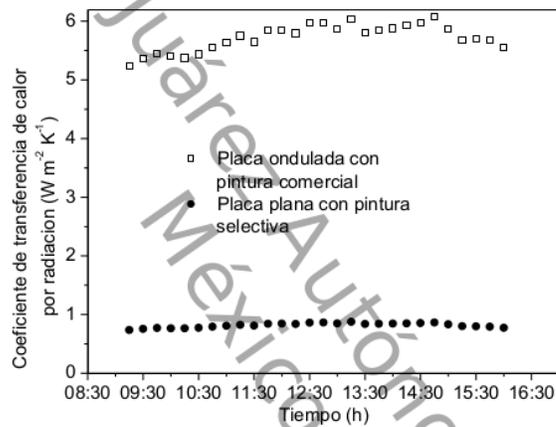


Figura 4.3 Coeficiente de transferencia de calor por radiación contra el tiempo

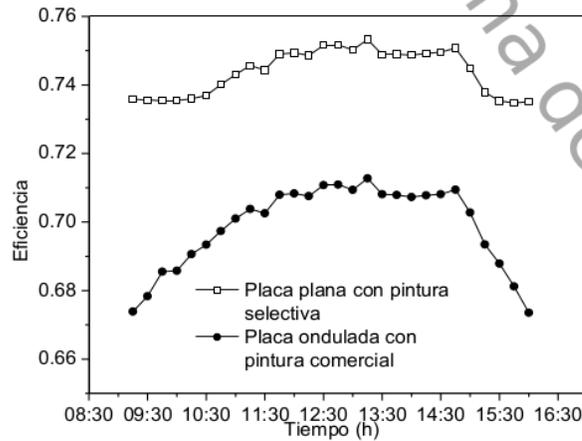


Figura 4.4. Variación de la eficiencia el 26 de mayo del 2016

En las Figuras 4.5-4.9 se presentan las comparaciones de los resultados de las variaciones de la temperatura en los diferentes elementos obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones (3.8 a 3.12) para los dos colectores. Las temperaturas de los diversos elementos aumentaron con el tiempo a medida que la radiación solar aumentó para mostrar sus valores máximos a la 13:15, luego disminuyeron conforme disminuyó la radiación solar. Los valores máximos calculados de T_c , T_p , T_b , T_{uao} , y T_{lao} en el primer colector son de 317.5, 343.0, 327.0, 317.8 y 320.0 respectivamente, y 319.0, 325.0, 317.0, 318 y 319.0 en el segundo colector respectivamente. En la Figura 4.5 se muestran las temperaturas en las cubiertas, las cuales son mucho más bajas que las temperaturas en las placas absorbedoras y que en las placas de fondo, lo cual es obvio por la baja absorptividad de la cubierta. Comparando las temperaturas en las cubiertas (Figura 4.5), se observa que las temperaturas más altas se presentan en la cubierta del segundo colector. Este resultado fue causado por la mayor emisividad del recubrimiento comercial aplicado a la placa absorbedora ondulada, lo que aumentó el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa y la cubierta (Figura 4.3), generando mayor flujo de calor por radiación hacia la cubierta de vidrio. Este mayor flujo de calor también causó un enfriamiento más rápido y temperaturas más bajas en la placa absorbedora del colector de placa ondulada (Figura 4.6). Este comportamiento concuerda con los observados en por Gao *et al.* [47] en el estudio de varias configuraciones de colectores.

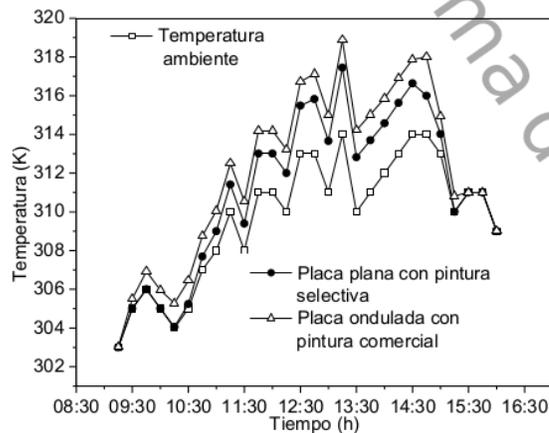


Figura 4.5. Variación de la temperatura en la cubierta el 26 de mayo del 2016

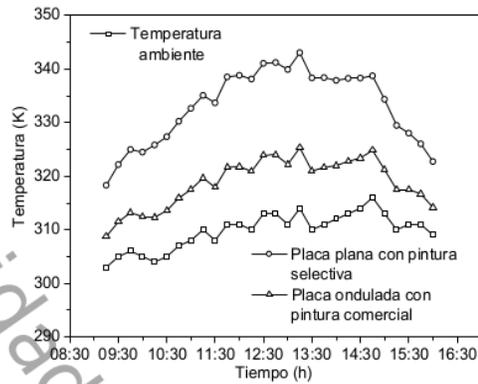


Figura 4.6. Variación de la temperatura en la placa absorbadora el 26 de mayo del 2016

En la placa inferior (Figura 4.7), se puede notar que las temperaturas son mayores en el primer colector ya que en este, las temperaturas de la placa absorbadora es mayor pero en ambos colectores la emisividad en la cara inferior de la placa absorbadora son iguales, lo que genera un mayor flujo de calor por radiación de la placa absorbadora hacia la placa inferior en el primer colector provocando mayores temperaturas. En un estudio realizado por Gao *et al.* en dos colectores, uno de placa absorbadora plana con recubrimientos selectivos y el otro de placa ondulada sin recubrimiento, encontraron que en las placas inferiores las temperaturas resultaron iguales. Esta diferencia en los resultados con el actual estudio, se debió a que estos colectores eran de un solo canal o un solo paso inferior, lo que aumentó la temperatura de la placa ondulada y generó un mayor flujo de calor por radiación hacia la placa del fondo.

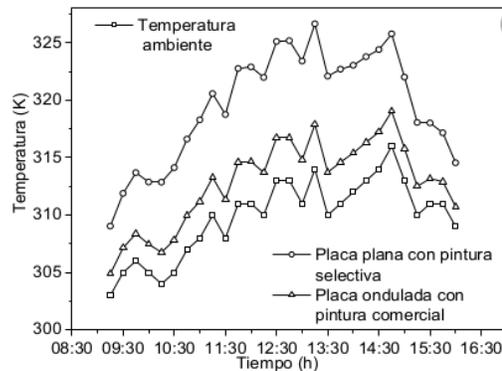


Figura 4.7. Variación de la temperatura en la placa de fondo el 26 de mayo del 2016

Las comparaciones entre las temperaturas de salida del aire circulante en el canal superior e inferior se muestran en las Figuras 4.8 y 4.9. Se puede observar que tanto en el canal superior como en el inferior, las temperaturas son ligeramente diferentes en ambos colectores. En el canal superior la temperatura es ligeramente superior para el segundo colector, debido a que en el segundo colector el área de transferencia de calor entre el aire y la placa aumenta en comparación con el primer colector, y por otro lado, la placa ondulada aumenta la turbulencia dentro de los canales superior e inferior lo que mejora los coeficientes de transferencia de calor desde la placa absorbidora hasta el aire que fluye en los canales superior e inferior. Este resultado concuerda con el obtenido por El-Sebaili *et al.* [45], en un estudio realizado a un colector de placa plana y el otro de placa ondulada. Mientras que en el canal inferior la temperatura fue ligeramente superior en el primer colector, debido a que el recubrimiento selectivo disminuyó el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa absorbidora y la cubierta de vidrio debido a su baja emisividad (Figura 4.3). Esto redujo significativamente las pérdidas de calor por radiación de la placa absorbidora hacia la cubierta de vidrio, incrementando la temperatura de la placa absorbidora y la placa del fondo (Figura 4.6 y 4.7), lo que mejoró la transferencia de calor por convección entre la placa y el aire en el canal inferior. En ambos casos de acuerdo a los cálculos la diferencia en las temperaturas fue de aproximadamente 0.23 K en promedio.

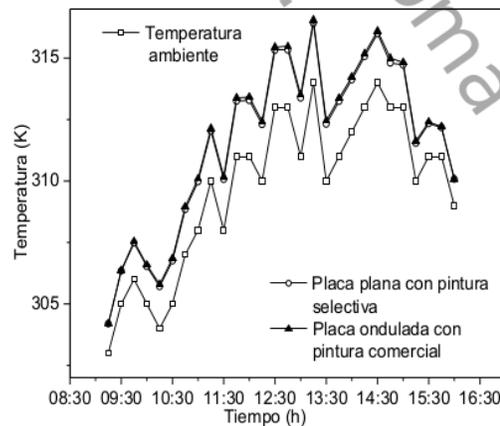


Figura 4.8. Variación de la temperatura en el aire del canal superior el 26 de mayo del 2016

Este estudio reveló que el recubrimiento selectivo de baja emisividad en la placa absorbidora del primer colector mejoró la eficiencia en un rango de 4 a 6% por encima de la eficiencia que la placa ondulada en el segundo colector.

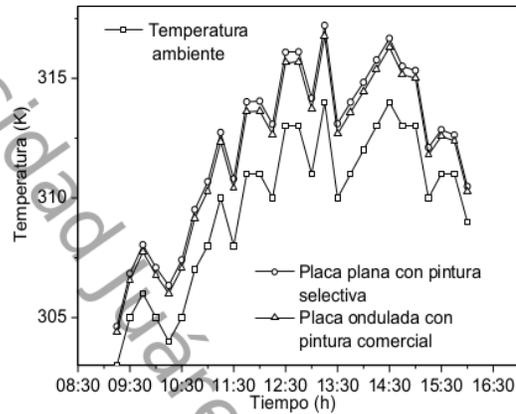


Figura 4.9. Variación de la temperatura en el aire del canal inferior el 26 de mayo del 2016

4.2. Cinética de secado en capa delgada de plátano cuadrado y taro en el laboratorio

4.2.1. Curvas de secado y velocidad de secado

La razón de humedad calculada con la ecuación 3.31 contra el tiempo de secado del taro y del plátano se muestran en la Figura 4.10. La humedad inicial en base húmeda para el plátano fue de 0.70 (2.33 en base seca) y para el taro de 0.69 (2.22 en base seca). En todos los casos la razón de humedad disminuyó continuamente con el tiempo de secado. El tiempo requerido para reducir la razón de humedad a cualquier nivel dado dependió de la temperatura de secado, siendo el más alto a 40 °C y el más bajo a 70 °C. Aunque la humedad inicial para el plátano y el taro fueron casi similares, el plátano se secó más rápido que el taro. El plátano se secó entre 200 y 300 min y la malanga entre 300 y 550 min aproximadamente como se indica en las Figuras 4.10 (a-b). La razón se puede atribuir a la distinta composición de los productos, lo que conduce a valores de difusividad de humedad efectiva mayores para el plátano.

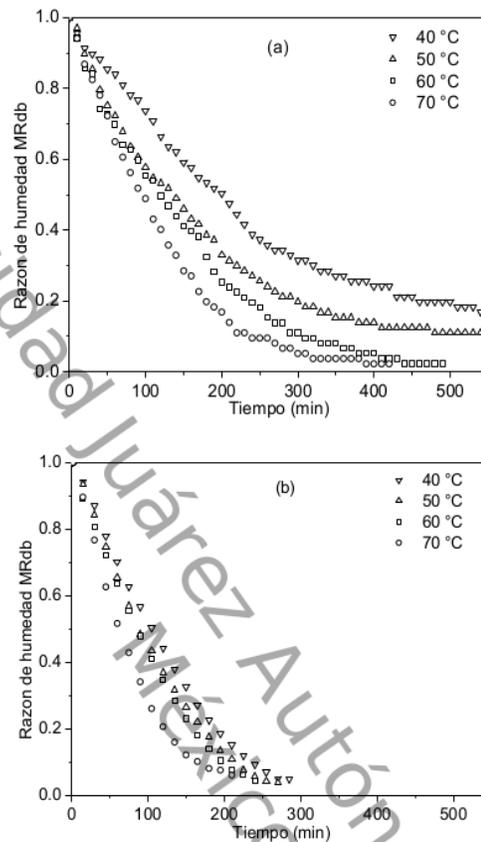


Figura 4.10. Razón de humedad contra el tiempo de secado (a) taro, (b) plátano

La velocidad de secado calculada con la ecuación (3.33) contra la razón de humedad del taro y del plátano se muestra en la Figura 4.11. En ambas gráficas se observa una influencia importante de la temperatura del aire de secado ya que esta incremento con la temperatura. El plátano alcanzó velocidades de secado más alta (0.020 kg agua/kg materia seca min) que el taro (0.012 kg agua/kg materia seca min) lo que se evidenció en un menor tiempo de secado. La velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso y disminuyó continuamente con el tiempo, esto debido a que la migración a la superficie de la humedad y la velocidad de evaporación de la superficie al aire disminuyen con la disminución de la humedad en el producto. El proceso se produjo en el periodo de velocidad de secado decreciente lo que indica que el proceso fue controlado mediante el

fenómeno de difusión. La eliminación de humedad a 70 °C fue más rápida que las otras temperaturas. Por lo tanto, una temperatura de secado más alta produjo una mayor velocidad de secado y un tiempo de secado más corto, en consecuencia, el contenido de humedad disminuyó más rápidamente. Este aumento en la velocidad de secado se debe al mayor potencial de transferencia de calor entre el aire y las rodajas de taro y plátano, que favorece la evaporación del agua. Por lo tanto, la temperatura de secado y la composición de los productos influyeron en la cinética de secado, lo cual coincide con los resultados reportados en otros estudios de diferentes productos agrícolas [12-14, 16, 25, 87-88].

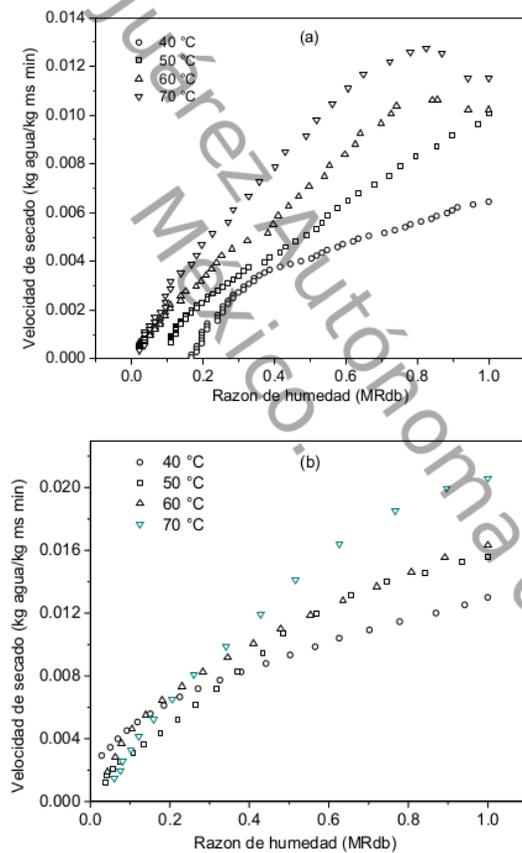


Figura 4.11. Velocidad de secado contra razón de humedad (a) taro, (b) plátano

4.2.2. Ajuste de las curvas de secado

Las curvas experimentales de la razón de humedad (Figura 4.10) se ajustaron a los cinco modelos de secado en capa delgada mostrados en la Tabla 3.1. Los resultados de los ajustes se muestran en la Tabla 4.1. El modelo de Wang y Singh a 40 °C, el de Henderson y Pabis a 50 °C y el de Page a 60 y 70 °C describen adecuadamente el proceso de secado del taro. El modelo de Wang y Singh a 40 y 60 °C, y el modelo de Page modificado a 50 y 70 °C se ajustaron mejor al proceso de secado del plátano. Estos modelos presentaron los valores más altos de R² y más bajo de RMSE como se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados del análisis de regresión de los modelos que mejor se ajustaron

Temperatura °C	Nombre del modelo	Parámetros	R ²	RMSE
Taro				
40	Wang y Singh	a = -3.04x10 ⁻³ , b = 2.74 2 x10 ⁻⁶	0.993 6	0.026 7
50	Henderson y Pabis	a = 0.967 65, k = 4.92x10 ⁻³	0.981 5	0.054 6
60	Page	k = 3.28x10 ⁻³ , n = 1.132 93	0.994 6	0.021 0
70	Page	k = 2.88x10 ⁻³ , n = 1.212 32	0.998 5	0.005 1
Plátano				
40	Wang y Singh	a = -5.6x10 ⁻³ , b = 7.63x10 ⁻⁶	0.998 5	0.002 8
50	Page	k = 1.81 x10 ⁻³ , n = 1.324 7	0.998 5	0.002 5
60	Wang y Singh	a = -6.92 x10 ⁻³ , b = 12.0785x10 ⁻⁶	0.999 5	0.000 7
70	Page	k = 3.97 x10 ⁻³ , n = 1.246 6	0.999 2	0.001 1

En la Figura 4.12 se comparan las curvas experimentales de secado a 40, 50, 60 y 70 °C del taro y del plátano con los modelos ajustados de la Tabla 4.1. Todos los valores de R² fueron superiores a 0.95 y de RMSE fueron inferiores a 0.06 indicando buen ajuste. Por lo tanto, estos modelos predicen adecuadamente la cinética de secado del taro y del plátano a todas las temperaturas.

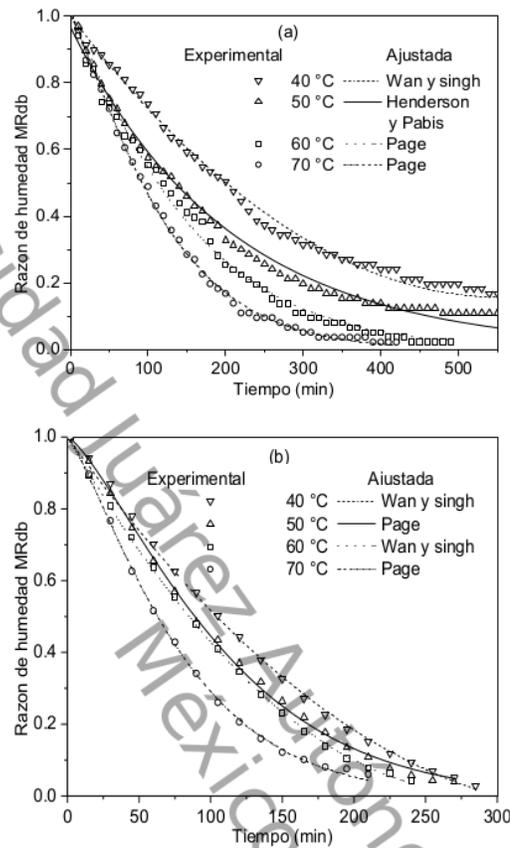


Figura 4.12. Razón de humedad experimental y ajustada contra tiempo de secado (a) taro y (b) plátano

4.2.3. Difusividad de humedad efectiva y energía de activación

La gráfica experimental de $\ln(MR)$ contra el tiempo de secado y los ajustes lineales para cada temperatura de secado del taro y el plátano se muestran en la Figura 4.13. El ajuste se evaluó en función del coeficiente de correlación o coeficiente de determinación (R^2). Con la pendiente de la recta ajustada y la ecuación (3.34) se calculó la difusividad de humedad efectiva para cada temperatura de secado. En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos. Todos los valores de R^2 fueron superiores a 0.95, lo que indica un ajuste adecuado. La difusividad de humedad efectiva aumentó con el incremento de la temperatura del aire de secado, en un rango de 1.5425 a $4.3399 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el taro y 3.799 a $6.3325 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el plátano. Los valores de difusividad de

humedad efectiva más altos encontrados en el plátano indican que la humedad se movió a través de este con mayor velocidad que en el taro (Figuras 4.11a y b). Esto debido a las diferencias combinadas de la microestructura del material, humedad del material, temperatura, difusión interna, flujo capilar, difusión de Knudsen y difusión superficial [89]. Por lo tanto, valores de difusividad efectiva más alto significan tiempos de secado más corto, lo que fue confirmado con un tiempo de secado más corto en el plátano. Así, el plátano que registró tiempos de secado más cortos alcanzó valores más alto de difusividad de humedad efectiva. Nguyen y Price [90] reportaron valores de $1.3-7.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, Thuwapanichayanan *et al.* [91] de $0.85-2.29 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y Joardder *et al.* [92] de $6.63-10.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para plátanos. Kumar *et al.* [39] reportaron valores de $8.3-21 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el secado de taro pre-tratado.

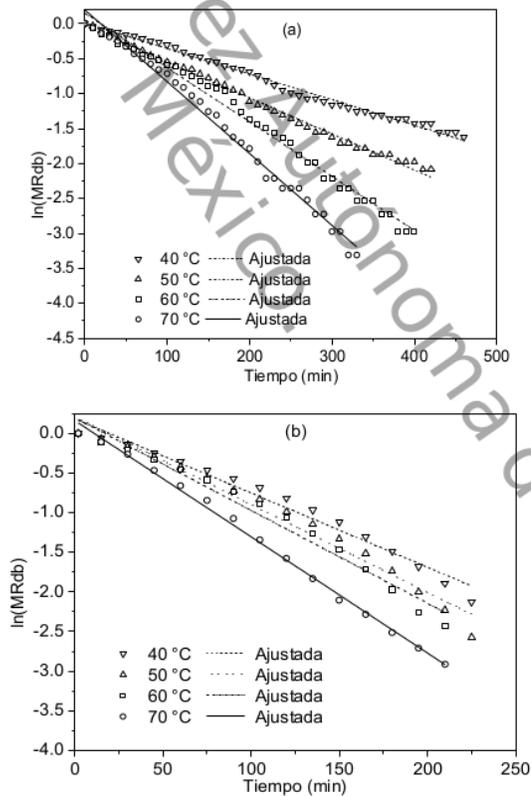


Figura 4.13 Ajuste lineal de $\ln(MR_{db})$ experimental contra el tiempo de secado (a) taro y (b) plátano

Tabla 4.2. Difusividad de humedad efectiva

Temperatura °C	Ecuación ajustada ln(MR _{db})	D _{eff} (m ² s ⁻¹)	R ²
Taro			
40	-0.003 65t + 0.0978	1.542 5 x 10 ⁻¹⁰	0.991 1
50	-0.005 16t - 0.0288	2.180 6 x 10 ⁻¹⁰	0.995 0
60	-0.007 77t + 0.1503	3.280 3 x 10 ⁻¹⁰	0.990 0
70	-0.010 28t + 0.1988	4.339 9 x 10 ⁻¹⁰	0.990 4
Plátano			
40	-0.009 3t + 0.183	3.799 5 x 10 ⁻¹⁰	0.974 8
50	-0.011 1t + 0.211	4.643 8 x 10 ⁻¹⁰	0.973 8
60	-0.011 6t + 0.196	5.066 0 x 10 ⁻¹⁰	0.975 1
70	-0.014 6t + 0.160	6.332 5 x 10 ⁻¹⁰	0.996 1

La Figura 4.14 muestra la recta ajustada a los datos experimentales de ln(D_{eff}) contra 1/T. La energía de activación se calculó con la pendiente de la recta ajustada y la ecuación (3.35) y fue de 31 050 J mol⁻¹ para el taro y 14 433.9 J mol⁻¹ para el plátano. Para el plátano, Bains y Langrish [93] reportaron un valor 13 500 J mol⁻¹, Nogueira y Park [94] hallaron valores en un rango de 15 500 - 25 300 J mol⁻¹. Kumar *et al.* [39] reportaron un rango de 78 920-105 800 J mol⁻¹ para taro precocidos en diferentes medios. La energía de activación para plátano fue menor que para el taro debido a que la humedad se movió con mayor velocidad dentro del plátano, lo que se refleja en una difusividad de humedad efectiva más alta en el plátano.

Los valores de la difusividad y de la energía de activación obtenidos en este estudio para el plátano y el taro resultaron diferentes a los reportados en la literatura, esto debido a las diferentes condiciones de secado, la variedad utilizada y las condiciones iniciales del producto. Sin embargo, estos valores están dentro del rango de 10⁻¹² a 10⁻⁸ m² s⁻¹ para la difusividad efectiva [25] y de 12 700 a 110 000 J mol⁻¹ para la energía de activación [95] para el secado de productos alimenticios.

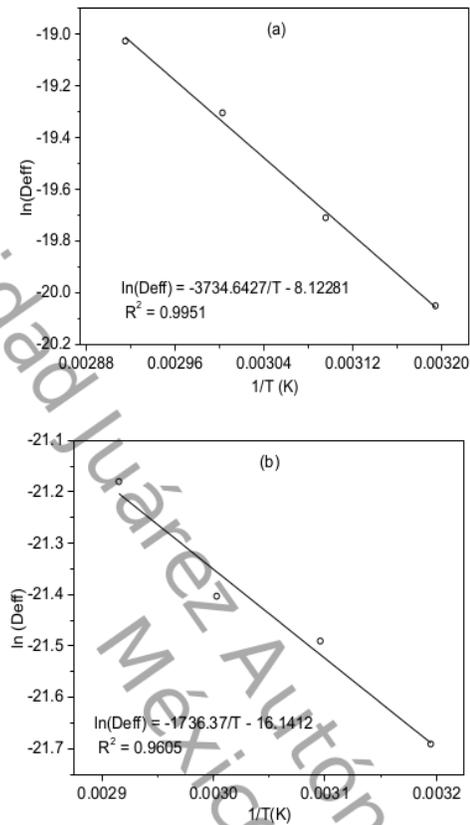


Figura 4.14 Relación de Arrhenius (a) taro, (b) plátano

4.3. Cinética de secado en capa delgada del taro y del mango verde en el secador solar

4.3.1. Construcción del secador solar

De los resultados obtenidos en la sección 4.1, se seleccionó para construir el colector de placa plana con recubrimiento selectivo. Las dimensiones del colector fueron de 0.7 m de ancho, 1.0 m de largo, 0.1 m de altura y un área de captación de 0.7 m². En la parte superior se colocó una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor. El fondo y los costados del colector se construyeron con panel de poliuretano con espesor de 0.0381 m (1.5 pulgada) revestido con lámina de acero galvanizado (Figura 4.15a). Se colocó

una placa absorbadora plana suspendida de acero galvanizado con la parte superior pintada con un recubrimiento selectivo de níquel negro nanoestructurado de baja emisividad (Figura 4.15b). En la Figura 4.16 se muestra el colector solar construido.



Figura 4.15a. Panel de poliuretano revestido con lámina de acero galvanizado



Figura 4.15b. Placa con recubrimiento selectivo

La cámara se construyó con base en las recomendaciones de la sección 2.3.2 con las siguientes dimensiones: 0.7 m de ancho, 0.5 m de profundidad y 0.7 m de altura. Se utilizó panel de poliuretano de 0.0381 m de espesor recubierto con acero galvanizado (Figura 4.15a). En la Figura 4.17 se muestra la cámara de secado construida.

En la parte superior de la cámara se colocó un ventilador centrífugo de 0.20 kW a 12 V. El ventilador se conectó a una fuente de alimentación de corriente directa GW INSTEK PSW 250-13.5 que permite ajustar la velocidad del aire a las velocidades deseadas. En el interior de la cámara se colocó una bandeja de madera con malla de alambre galvanizado de 0.40 m de ancho y 0.60 m de largo. En la Figura 4.18 se muestra el secador solar construido.



Figura 4.16. Colector solar de placa absorbadora plana con recubrimiento selectivo



Figura 4.17. Cámara de secado del secador solar



Figura 4.18. Secador solar construido

4.3.2. Cinética de secado del taro

En esta sección se estudió el efectos de la velocidad del aire de secado sobre la cinética de secado en capa delgada del taro (*colocasia esculenta*) en el secador solar a velocidades del aire de secado de 0.16, 0.24 y 0.32 m s⁻¹.

4.3.2.1. Radiación solar y temperatura ambiente

La radiación solar y la temperatura ambiente medidas durante las pruebas frente al tiempo se muestran en la Figura 4.19. La temperatura ambiente varió de 30 a 44 °C y la radiación solar de 180 a 1 000 W m⁻² aproximadamente.

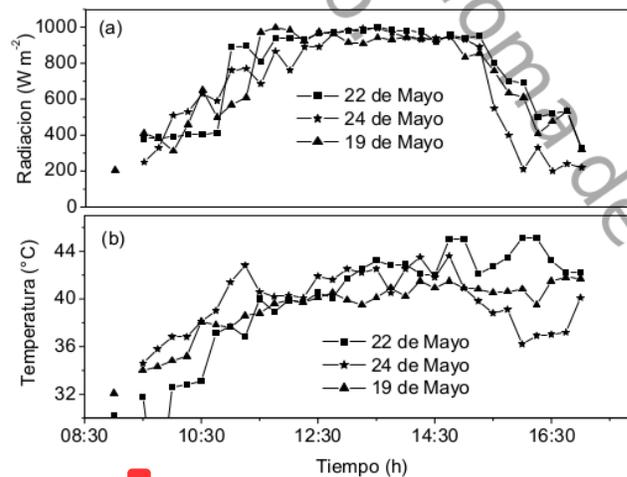


Figura 4.19. Radiación solar y temperatura ambiente frente al tiempo

La radiación solar presentó pequeñas fluctuaciones el 19 y 22 de Mayo de las 8:30 a las 10:30, y el 24 de Mayo de las 8:30 a las 11:30 y de 14:30 a 16:30 debido a la presencia de nubes. La humedad relativa varió de 40 a 64 % el 19 de Mayo, de 41 a 62 % el 22 de Mayo y de 41 a 62 % el 24 de Mayo. La temperatura del aire de secado en la cámara estuvo en el rango de 30 °C a 48 °C el 19 de Mayo, de 30 °C a 46 °C el 22 de Mayo y de 32 °C a 46 °C el 24 de Mayo.

4.3.2.2. Razón de humedad y velocidad de secado

La razón de humedad experimental obtenida con la ecuación (3.31) se graficó contra el tiempo de secado (Figura 4.20). Se puede observar un efecto reducido de la velocidad del aire sobre el comportamiento de secado de las rodajas de taro en el rango seleccionado. Un aumento en la velocidad del aire de secado se acompañó de una disminución en el tiempo de secado el 19 y el 22 de mayo. El 19 y 24 de Mayo el tiempo de secado fue de 8 h. La razón de este efecto puede atribuirse a que la radiación solar varió debido a la presencia de nubes en ciertos intervalos de tiempo, lo que ocasionó que la temperatura de aire de secado proveniente del colector disminuyera. Sin embargo en los tres casos la razón de humedad disminuyó continuamente con el tiempo hasta alcanzar un valor mínimo aproximado de 0.17, el cual es un comportamiento típico en el secado de productos agrícolas [21]. El menor tiempo de secado fue de 6.5 h el 22 de Mayo. La razón de humedad para este estudio presentó una tendencia similar a los reportados por Reyes *et al.* [9] para hongos y Amer *et al.* [10] para plátanos. La velocidad del aire de secado influyó positivamente en el tiempo y en la velocidad de secado, ya que cuando la velocidad del aire de secado se incrementó, el tiempo de secado disminuyó (Figura 4.20) y la velocidad de secado aumentó (Figura 4.21). Estudios realizados para diferentes productos variando la velocidad del aire de secado, presentaron un comportamiento similar al observado en esta investigación [14, 25, 38]. Este comportamiento es claramente observable en días soleados como el día 19 y 22 de Mayo. Sin embargo, en días nublados o parcialmente nublados como el día 24 de Mayo el tiempo de secado y la velocidad de secado se ven además afectados por la variación de la radiación solar. Por lo tanto, en un proceso de secado solar un aumento en las velocidades del aire de secado no implica una disminución en el tiempo de secado

ya que depende de factores adicionales como: la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

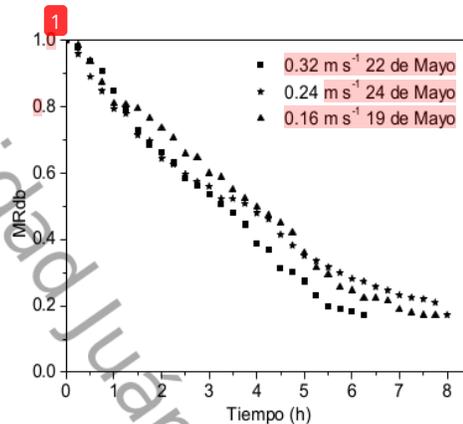


Figura 4.20. Razón de humedad

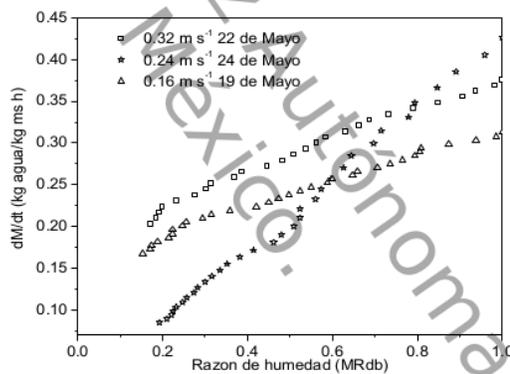


Figura 4.21. Velocidad de secado contra la razón de humedad

En la Figura 4.21 se muestra la velocidad de secado calculada con la ecuación (3.33) contra la razón de humedad. Se puede observar que todo el proceso se realizó en el periodo de velocidad de secado decreciente, esto indica que la difusión predominó en el proceso de secado. La velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso y conforme el proceso avanzó, la velocidad de secado disminuyó continuamente con el tiempo. El 22 de Mayo la velocidad de secado se mantuvo de 17 a 23 % por encima del 19 de Mayo. El 24 de Mayo la velocidad de secado mostró un comportamiento muy diferente. Al inicio

desde una razón de humedad de 1.0 a 0.78 fue mayor que el 19 y el 22 de Mayo, de 0.78 a 0.57 fue menor que el 22 de Mayo y mayor que el 19 de Mayo, después de 0.6 hasta el final del secado fue menor que el 19 y 22 de Mayo. Este comportamiento se debió a la variación en la radiación solar por la presencia de nubes durante el día. Al respecto, Akoy [16], y Shi et al. [14] reportaron resultados similares en el secado de rodajas de diferentes productos.

4.3.2.3. Ajuste de los modelos de secado

La razón de humedad experimental para cada velocidad se ajustó mediante un análisis de regresión no lineal a los seis modelos de secado en capa delgada mostrados en la Tabla 3.1. Los resultados del análisis de regresión de los modelos que mejor se ajustaron a cada caso se muestran en la Tabla 4.3. En todos los casos, los valores de R^2 fueron superiores a 0.95 y los valores de RMSE fueron inferiores a 0.06 indicando un buen ajuste. De los seis modelos, se encontró que el modelo de Wang y Singh fue el que mejor predijo el proceso de secado a 0.16 y 0.32 $m\ s^{-1}$, y el modelo de Henderson y Pabis a 0.24 $m\ s^{-1}$ (Figuras 4.22a-c).

Tabla 4.3. Resultados del análisis de regresión de los modelos que mejor se ajustaron

Velocidad	Nombre del modelo	Parámetros	R^2	RMSE
0.16 $m\ s^{-1}$	Wang y Singh	$a = -0.147\ 17, b = 0.007\ 442$	0.993 8	0.014 17
0.24 $m\ s^{-1}$	Henderson y Pabis	$a = 0.993\ 95, k = 0.205\ 900$	0.994 9	0.008 83
0.32 $m\ s^{-1}$	Wang y Singh	$a = -0.177\ 19, b = 0.006\ 510$	0.995 6	0.007 40

Las Figuras 4.22d-f muestran una comparación entre la razón de humedad experimental y la razón de humedad predicha con los modelos ajustados. Se observa que los puntos están agrupados alrededor de líneas rectas ajustadas a los puntos experimentales cuyas pendientes son aproximadamente igual a 1. Los valores de R^2 y de RMSE del ajuste lineal resultaron superiores a 0.95 e inferiores a 0.06 respectivamente indicando un buen ajuste. Esto confirma que los modelos describen adecuadamente el comportamiento de secado de las rodajas de taro.

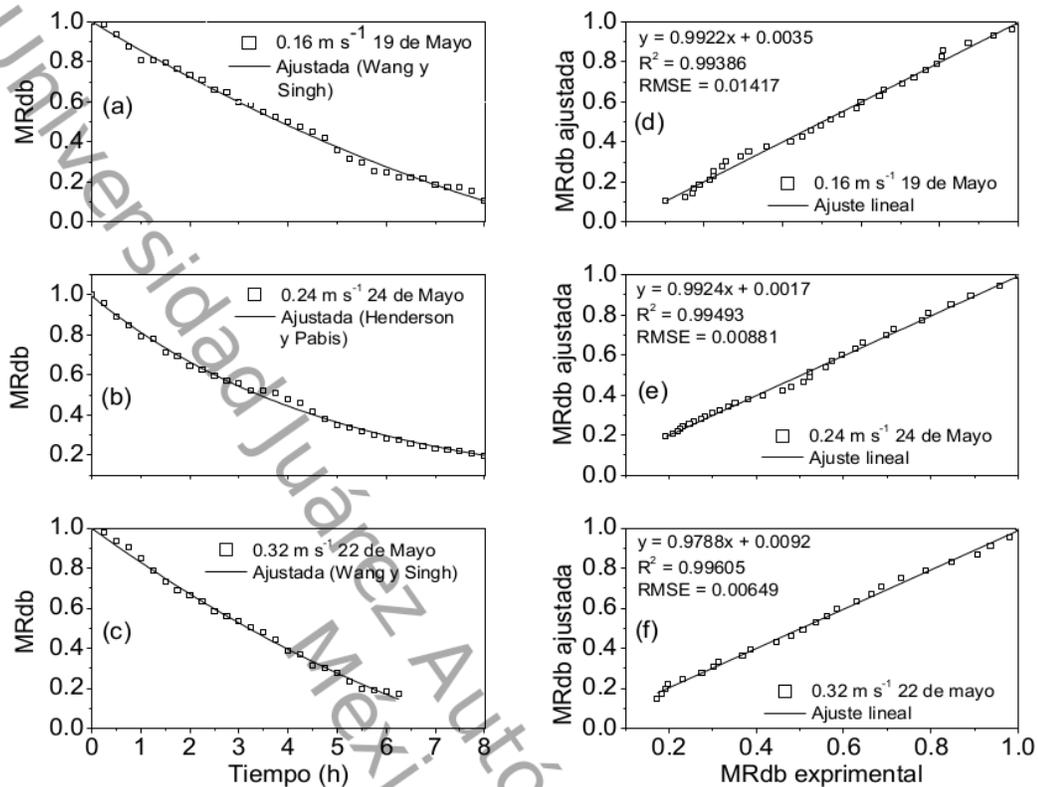


Figura 4.22. Comparación entre la razón de humedad experimental y ajustada

4.3.3. Cinética de secado del mango

Como se observó en la sección 4.3.2.2, a mayor velocidad del aire de secado menor tiempo de secado, en esta sección se estudio la cinética de secado en capa delgada del mango verde a 0.32 m s^{-1} en el secador solar.

4.3.3.1. Razón de humedad y velocidad de secado

La razón de humedad contra el tiempo de secado de las rebanadas de mango se muestra en la Figura 4.23. Como en el taro y el plátano, la razón de humedad disminuyó continuamente con el tiempo. La Figura 4.24 muestra la velocidad de secado en función de la razón de humedad. El proceso de secado presentó un período de velocidad de secado decreciente típico en los productos agrícola, con una fase de inicial de velocidad de secado creciente muy corta ($(0.9 < MR < 1)$). El secado se realizó mayormente en el

segundo periodo que indica que la difusión fue el mecanismo físico que gobernó la eliminación de la humedad durante el secado de las rebanadas de mango. No se observó el período de velocidad de secado constante. El tiempo de secado necesario para alcanzar la humedad de equilibrio fue de 15 horas en dos días. Al respecto Krishna y Manohar [96] y Akoy [16] encontraron un comportamiento similar en la velocidad de secado.

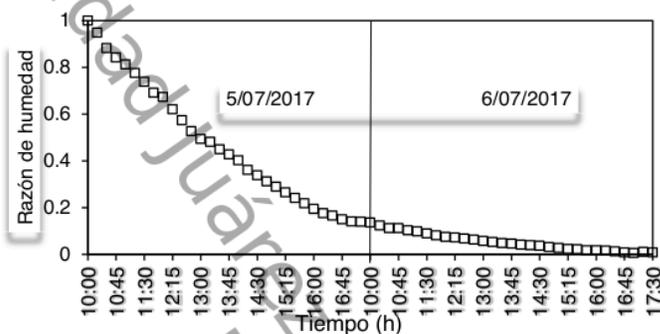


Figura 4.23. Razón de humedad del mango

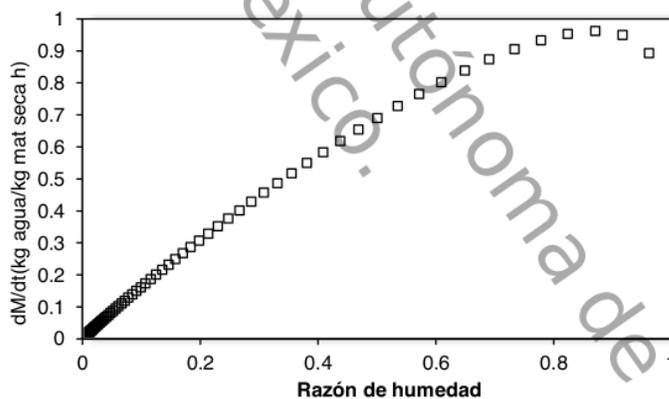


Figura 4.24. Velocidad de secado en función de la razón de humedad

4.3.3.2. Ajuste de los modelos de secado

La Figura 4.25a-f muestra una comparación entre los datos experimentales y cada uno de los modelos ajustados. La Tabla 4.4 muestra los valores de las constantes de secado y los coeficientes de secado de los modelos probados. La adaptación de los modelos de

secado de capa delgada a los datos experimentales se evaluó en términos de los parámetros estadísticos R^2 y RMSE.

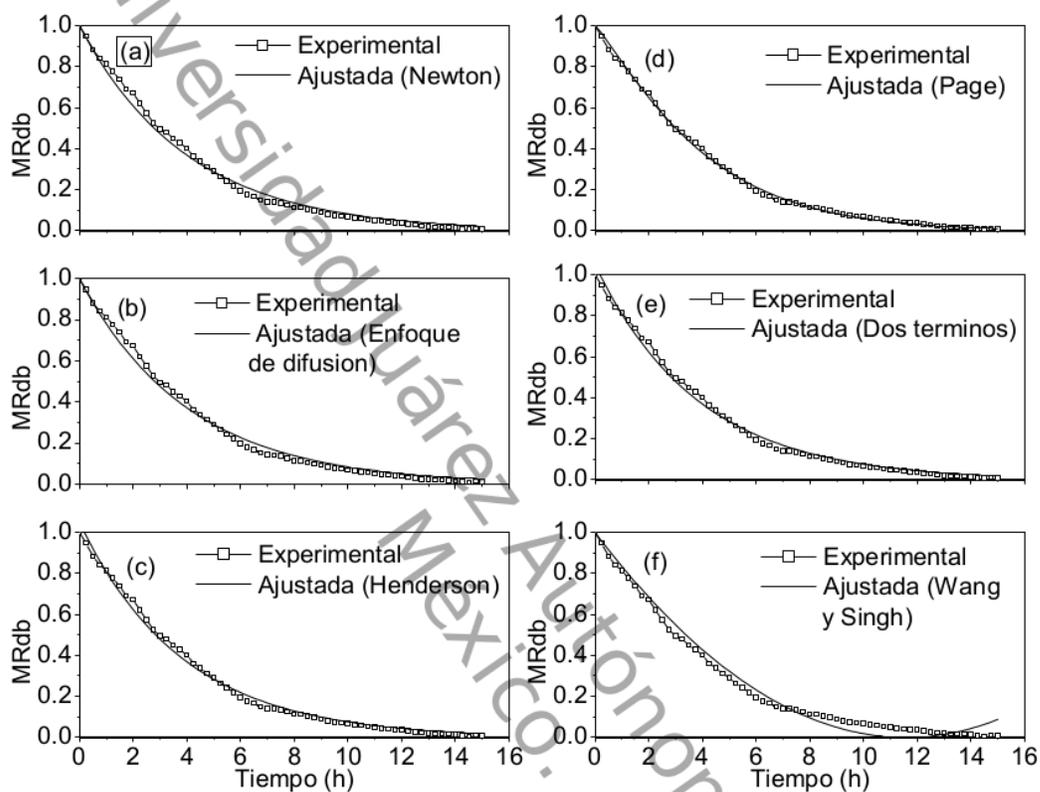


Figura 4.25. Comparación entre los datos experimentales y las curvas ajustadas con los modelos probados de la razón de humedad.

Los valores de R^2 fueron superiores a 0.95 y los valores de RMSE excepto para el modelo Wang y Singh fueron inferiores a 0.06, indicando un buen ajuste [97-98]. Estos valores muestran que los seis modelos de secado probados predicen adecuadamente el proceso de secado en capas delgadas de rebanadas de mango. El modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales (Figura 4.25d) con un valor de $R^2 = 0.9985$ y $RMSE = 0.0075$ (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Resultado del ajuste de los modelos probados

Nombre del modelo	Parámetros	R ²	RMSE
Newton	k = 0.248 95	0.992 2	0.037 54
Page	k = 0.193 36 5, n = 1.15914	0.998 5	0.007 50
Enfoque de difusión	a = 0.910 1, k = 0.247 8, b = 1	0.991 9	0.037 63
Dos términos	a = 0.524 81, k1 = 0.260 8, b = 0.524 8, k2 = 0.260 79	0.994 3	0.026 27
Henderson	a = 1.049 62, k = 0.260 79	0.994 5	0.026 27
Wang y singh	a = -0.172 74, b = 0.007 47	0.983 6	0.078 17

En la Figura 4.26 se muestra la gráfica de dispersión de los datos experimentales contra los datos analíticos usando el modelo de Page. En esta Figura se observa que los datos están agrupados alrededor de la línea recta ajustada por regresión lineal cuya pendiente es igual a 1.0056, lo que confirma que este modelo describe adecuadamente las características de secado de rodaja de mango.

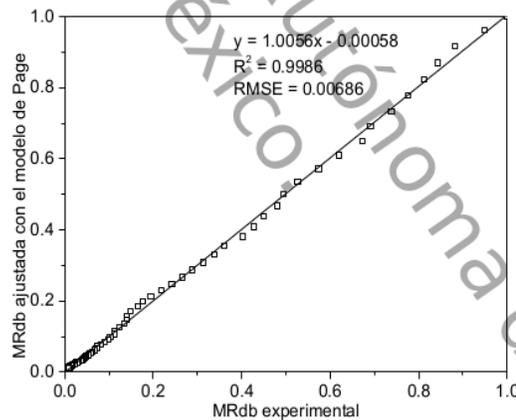


Figura 4.26. Comparación de MR experimental y predicha con el modelo de Page.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

5.1. Conclusiones

En esta tesis se realizó un estudio del secado de productos agrícolas en un secador de laboratorio y en un secador solar tipo colector-cabina. Las principales conclusiones se detallan a continuación.

En el modelado y simulación del colector solar, los resultados mostraron que la variación en las temperaturas, el calor útil y la eficiencia, siguieron la tendencia de la radiación solar. La eficiencia total fue de 74.5 % para el colector con placa plana y recubrimiento selectivo y de 70.1 % para el colector con placa ondulada con pintura comercial. La eficiencia instantánea en el primer colector varió en un rango de 73.5 a 75.5% y en un rango de 67.5 a 71.5. Lo que indica que el recubrimiento selectivo de níquel negro nanoestructurado mejoró la eficiencia del colector solar de placa plana al reducir las pérdidas por radiación. Basado en los resultados anteriores, se seleccionó para el secador solar, el colector solar de placa plana suspendida con recubrimiento selectivo de níquel negro nanoestructurado de baja emisividad.

En el secador de laboratorio el modelo de Wang y Singh a 40 °C, el de Henderson y Pabis a 50 °C y el de Page a 60 y 70 °C describieron adecuada el proceso de secado del taro. El modelo de Wang y Singh a 40 y 60 °C, y el modelo de Page modificado a 50 y 70 °C se ajustaron mejor al proceso de secado del plátano. La difusividad de humedad efectiva aumentó con el incremento de la temperatura del aire de secado, en un rango de $1.5425-4.3399 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el taro y $3.799 \text{ } 5-6.332 \text{ } 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el plátano. La energía de activación fue de 31 050 J mol⁻¹ para el taro y 14 433.9 J mol⁻¹ para el plátano cuadrado. La velocidad de secado aumentó con el incremento de la temperatura causando una reducción del tiempo de secado. Los valores obtenidos están dentro del rango de 10^{-12} a $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la difusividad efectiva y de 12 700 a 110 000 J mol⁻¹ para la energía de activación para el secado de productos alimenticios. El tiempo de secado necesario para alcanzar la humedad de equilibrio, la velocidad de secado, la difusividad de humedad efectiva y la energía de activación dependieron de la fruta a secar y de la temperatura del aire.

En el secador solar los resultados mostraron que el modelo de Wang y Singh fue el modelo de secado adecuado para describir el proceso de secado del taro a 0.16 y 0.32 m s^{-1} , y el de Henderson y Pabis a 0.24 m s^{-1} . En el caso del mango verde que solo se hizo un experimento el modelo de Page describió mejor el proceso de secado. El tiempo de secado necesario para alcanzar la humedad de equilibrio para el taro varió en el rango de 6.5 a 8 h y para el mango fue de 15 horas en dos días. La velocidad del aire de secado afectó positivamente la velocidad de secado y el tiempo de secado solo en los días soleados. El secado del taro y del mango presentaron un período de velocidad de secado decreciente típico en los productos agrícolas. El mango presentó una fase inicial de velocidad de secado creciente muy corta. Las gráficas de dispersión de la razón de humedad experimental contra la razón de humedad predicha confirmaron que estos modelos describen adecuadamente el comportamiento de secado de las rodajas del taro y del mango verde. El proceso de secado fue afectado por el tipo de producto, la humedad inicial, la temperatura, la velocidad del aire, la humedad relativa y la radiación solar.

Tanto en el secado de laboratorio como en el secador solar el proceso de secado ocurrió en el período velocidad decreciente, lo que indica que la difusión reguló el movimiento de humedad dentro de los productos. La razón de humedad disminuyó continuamente con el tiempo. La velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso y conforme avanzó, la velocidad de secado disminuyó continuamente con el tiempo.

5.2. Investigaciones futuras

Realizar un análisis bromatológico de los productos secados a fin de determinar la calidad del secado.

Analizar la cinética de secado de taro, mango y plátano a diferentes capacidades del producto a secar en el secador solar.

Realizar experimentos a 0.75, y 1.0 cm de espesor de rodajas y a diferentes inclinaciones del colector solar según la época del año en el secador solar, para determinar los efectos sobre la cinética de secado.

Analizar el secador solar a diferentes porcentajes de recirculación del aire de secado.

Adecuar y analizar el secador solar para que trabaje en forma híbrida manteniendo constante la temperatura en el interior de la cámara de secado y permitir su uso durante las noches.

Analizar la cinética de secado de pan de sopa, yuca, plátano verde, cacao, coco, etc., en el secador solar, con el objetivo de implementar un sistema de secado para aumentar su vida útil cuando existe un exceso de producción, considerando que estos productos se cosechan durante todo el año

REFERENCIAS

- [1] N.A.S. A. (NASA), <http://eosweb.larc.nasa.gov>, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2012. [En línea]. Available:<http://eosweb.larc.nasa.gov>.
- [2] SAGARPA, Servicio de información agroalimentaria y pesquera, México, 1980-2011.
- [3] V. Belessiotis and E. Delyannis, Solar drying, *Solar Energy*, **85**, 1665-1691, (2011).
- [4] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar and G. Ranko, A review of solar drying technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2652-2670, (2012).
- [5] G. Pirasteh, R. Saidur, S. Rahman and N. Rahim, A review on development of solar drying applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **31**, 133-148, (2014).
- [6] A. Mustayen, S. Mekhilef and R. Saidur, Performance study of different solar dryers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **34**, 463-470, (2014).
- [7] E. C. López Vidanña, L. L. Méndez Lagunas and J. Rodríguez Ramírez, Efficiency of a hybrid solar–gas dryer, *Solar Energy*, **93**, 23-31, (2013).
- [8] S. Sevik, Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products, *Solar Energy*, **105**, 190–205, (2014).
- [9] A. Reyes, A. Mahn and F. Vásquez, Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change, *Energy Conversion and Management*, **83**, 241-248, (2014).
- [10] B. M. A. Amer, M. A. Hossain and K. Gottschalk, Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for plátano., *Energy Conversion and Management*, **51**, 813-820, (2010).
- [11] A. Babetto, F. Freire, M. Barrozo and J. Freire, Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best, *Journal of Food Engineering*, **107**, 347-352, (2011).
- [12] S. Meziane, Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer, *Energy Conversion and Management*, **52**, 1644-1649, (2011).

- [13] I. Doymaz and O. Ismail, Drying characteristics of sweet cherry, *Food and Bioproducts Processing*, **89**, 31-38, (2011).
- [14] Q. Shi, Y. Zheng and Y. Zhao, Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices, *Energy Conversion and Management*, **71**, 208-216, (2013).
- [15] W. da Siva, C. Silva, F. Gama and J. Gomes, Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, **13**(1), 67-74, (2013).
- [16] E. O. M. Akoy, Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices, *International Food Research Journal*, **21**(5), 1911-1917, (2014).
- [17] R. Torrez Irigoyen, S. Goñi and S. Giner, Drying–toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model, *Journal of Food Engineering*, **142**, 70–79, (2014).
- [18] J. Blanco Gálvez, Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas, Almería: Plataforma Solar de Almería. CIEMAT. (2002).
- [19] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, USA: John Wiley & Sons, (2013).
- [20] Aboubakar, Y. Njintang, J. Scher and C. Mbofung, Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches, *Journal of Food Engineering*, **86**, 294-305, (2008).
- [21] O. Ekechukwu, Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory, *Energy Conversion and Management*, **40**(6), 593-613, (1999).
- [22] H. CW, *Drying and storage of agricultural products*. Avi Westport, (1980).
- [23] J. Perry, *Chemical Engineering Handbook*, 8th ed. ed., New York: McGraw-Hill, (2007).
- [24] D. A. Balladin, I. Chang Yen, D. R. McGaw and O. Hea, Solar drying of west Indian ginger rhizome using a wire basket dryer, *Renewable Energy*, **7**(4), 409-418, (1996).

- [25] A. Zhu and X. Shen, The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **72**, 345-351, (2014).
- [26] S. Kumar-pandey, S. Diwan and R. Soni, Review of mathematical modelling of thin layer drying process, *international journal of current engineering and scientific research*, **2**(11), 96-107, (2015).
- [27] I. Togrul and D. Pehlivan, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, *Journal of Food Engineering*, **65**(3), 413-425, (2004).
- [28] J. Crank, *Mathematics of diffusion*, Oxford: Clarendon Press, 1975.
- [29] W. Silva, C. Silva, V. Farias and J. Gomes, Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation, *Dry. Technol.*, **30**, 164-174, (2010).
- [30] L. B. Haj Said, S. Bellagha and K. Allaf, Measurements of texture, sorption isotherms and drying/rehydration kinetics of dehydrofrozen-textured apple, *Journal of Food Engineering*, **165**, 22-33, (2015).
- [31] M. Edrisi Sormoli and T. A. Langrish, Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder, *LWT - Food Science and Technology*, **62**, 875-882, (2015).
- [32] K. Muzaffar and K. Pradyuman, Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder, *Powder Technology*, **291**, 322-327, (2016).
- [33] A. S. Mujumdar, *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*: Science Publishers, p. Enfield – NH, USA, (2000).
- [34] T. Koyuncu, Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications, *Renewable Energy*, **31**, 1073-1088, (2006).
- [35] A. Esper and W. Muhlbauer, Solar drying an effective means of food preservation., *Renew Energy*, **15**, 95-100, (1998).

- [36] O. Ekechukwu and B. Norton, Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications, *Energy Convers. Manage.*, **40**, 657-667, (1999b).
- [37] A. Idlimam, A. Lamharrar, N. Abdenouri, C. Kane, S. Akkad, A. Jamali and M. Kouhila, M. Kouhila, Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of *Argania spinosa* and *zygophyllum gaetulum*, *J. Agron.*, **7**(1), 1-14, (2007).
- [38] A. Koukouch, A. Idlimam, M. Asbik, B. Sarh, B. Izrar, A. Bah and A. Ansari, Thermophysical characterization and mathematical modeling of convective solar drying of raw olive pomace, *Energy Convers. Manag.*, **99**, 221-230, (2015).
- [39] V. Kumar, H. K. Sharma and K. Singh, Mathematical Modeling of Thin Layer Microwave Drying of Taro Slices, *J. Inst. Eng. India Ser. A*, **97**, 1, 53–61, (2016).
- [40] T. Y. Tunde-Akintunde, Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper, *Renew Energy*, **36**, 2139–2145, (2011).
- [41] D. Rabha, P. Muthukumar and C. Somayaji, Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer, *Renewable Energy*, **105**, 583-589, (2017).
- [42] G. Wisniewski, "Market development of the solar crops drying in Poland and, *Renewable Energy*, **16**, 1278-83, (1999).
- [43] O. Ekechukwu and B. Norton, Review of solar energy drying system II: an overview, *Energy Convers Manage*, **40**, 615-55, (1999).
- [44] Y. Dhote and S. Thombre, Performance Analysis and Parametric Study of a Natural Convection Solar Air Heater With In-built Oil Storage, *J. Inst. Eng. India Ser. C*, **97**, 527-537, (2016).
- [45] A. El-Sebaili, S. Aboul-Enein, M. Ramadan, S. Shalaby and B. Moharram, Thermal performance investigation of double pass-finned plate solar air heater, *Applied Energy*, **88**, 1727-1739, (2011).

- [46] A. El-Sebaili and S. Shalaby, Experimental investigation of an indirect mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint, *Energy Convers. Manag.*, **74**, 109-116., (2013).
- [47] W. Gao, W. Lin, T. Liu and C. Xia, Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters, *Applied Energy*, **84**, 425-441, (2007).
- [48] H. Yeh and C. Ho, Effect of external recycle on the performances of flat-plate solar air heaters with internal fins attached., *Renew Energy*, **34**, 1340–1347, (2009).
- [49] F. Forson, M. Nazhab, F. Akuffo and H. Rajakaruna, Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb, *Renewable Energy*, **32**, 2306–2319, (2007).
- [50] I. Macedo and C. Altemani, Experimental evaluation of natural convection solar air heaters, *Sol Energy*, **20**, 5, 367-9, (1978).
- [51] S. Suman, M. Kaleem Khann and P. Manabendra, Performance enhancement of solar collectors -A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **49**, 192-210, (2015).
- [52] A. Saxena, Varun and A. El-Sebaili, A thermodynamic review of solar air heaters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **43**, 863-890, (2015).
- [53] I. Luminosu and L. Fara, Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation, *Energy*, **30**, 731-747, (2005).
- [54] R. Corvalan, M. Horn, R. Roman and L. Saravia, *Ingeniería del secado solar.*, CYTED-D, (1995).
- [55] F. Forson, M. Nazhab, F. Akuffo and H. Rajakaruna, Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb, *Renewable Energy*, **32**, 2306–2319, 2(007).
- [56] FAOSTAT, FAO statistics division 2013. (Retrieved February 23, 2016, from), (2014).

- [57] SIACON, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta, (2014).
- [58] V. Espinosa-Solis, J.-I. Jane y L. A. Bello-Perez, Physicochemical characteristics of starches from unripe fruits of mango and banana, *Starch-Starke*, **6**(5), 291-299, (2009).
- [59] T. Anyasi, A. I. O. Jideani and G. R. A. Mchau, Functional properties and postharvest utilization of commercial and noncommercial banana cultivars, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **12**(5), 509-522, (2013).
- [60] L. De La Torre-Gutiérrez, L. A. Chel-Guerrero and D. Betancur-Ancona, Functional properties of square banana (*Musa balbisiana*) starch, *Food Chemistry*, **106**, 1138-1144, (2008).
- [61] T. A. Anyasi, A. I. Jideani and G. R. Mchau, Effect of organic acid pretreatment on some physical, functional and antioxidant properties of flour obtained from three unripe banana cultivars, *Food Chemistry*, **172**, 515-522, (2015).
- [62] J. Rodríguez Miranda, J. M. Rivadeneyra Rodríguez, E. d. J. Ramirez Rivera, J. M. Juárez Barrientos, E. Herrera Torres, R. O. Navarro Cortez y B. Hernández Santos, Caracterización fisicoquímica, funcional y contenido fenólico de harina de malanga (*Colocasia esculenta*) cultivada en la región de Tuxtepec, Oaxaca, México, *Ciencia y Mar*, **15**(43), 37-47, (2011).
- [63] P. Kaushal, V. Kumar and H. Sharma, Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends, *LWT Food Sci. Technol*, **48**, 59-68, (2012).
- [64] Y. Sugimoto, K. Nishihara and H. Fuwa, Some properties of taro (*ishikawa-wase* and *takenokoimo*) and yam (*iseimo* and *nagaimo*) starches, *Journal of the Japanese Society of Starch Science*, **33**, 169-176, (1986).
- [65] S. Sefa-Dedeh and E. K. Agyir-Sackey, Starch structure and some properties of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* and *Colocasia esculenta*) starch and raphides, *Food Chemistry*, **79**, 435-444, (2002).

- [66] P. G. Hong and K. W. Nip, Functional properties of precooked taro flour in sorbets, *Food Chemistry*, **36**, 261-270, (1990).
- [67] M. Kaur, P. Kaushal and K. Sandhu, Studies on physicochemical and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta* L.) flour in comparison with a cereal, tuber and legume flour, *J. Food Sci. Technol.*, **48**, 1-7, (2011).
- [68] M. Ammar, A. Hegazy and S. Bedeir, Using of taro flour as partial substitute of wheat flour in bread making, *World J. Dairy Food Sci*, **42**, 94–99, (2009).
- [69] C. Emmanuel, N. Osuchukwu and L. Oshiele, Functional and sensory properties of wheat (*Aestium triticium*) and taro flour (*Colocasia esculenta*) composite bread, *Afr. J. Food Sci.*, **4**(5), 248-253, (2010).
- [70] M. Himeda, Y. Njintang, E. Fombang, B. Facho, P. Kitissou, C. Mbofung y J. Scher, Chemical composition, functional and sensory characteristics of wheat-taro composite flours and biscuits, *J. Food Sci. Technol.*, **51**(9), 1893-1901, (2014).
- [71] V. Kumar, H. Sharma, P. Kaushal and K. Singh, Optimization of taro-wheat composite flour cake using Taguchi technique, *Food Meas.*, **9**(1), 35–51, (2015).
- [72] P. Kaushal and H. Sharma, 10.1080/10942912.2012.665405, *Int. J. Food Prop.*, **17**(4), 765-781, 2014.
- [73] Ll. Bello-Pérez, A. Aparicio-Saguilan, G. Méndez-Montealvo, J. Solorza-Feria and E. Flores-Huicochea, Isolation and Partial Characterization of Mango (*Magnifera indica* L.) Starch: Morphological, Physicochemical and Functional Studies, *Plant Foods for Human Nutrition*, **60**, 7-12, (2005).
- [74] B. Mahayothee, S. Neidhart, R. Carle and W. Mühlbauer, Effects of variety, ripening condition and ripening stage on the quality of sulphite-free dried mango slices, *Eur Food Res Technol*, **225**, 723-732, (2007).
- [75] E. Kavak-Akpinar, Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses, *Energy Conversion and Management*, **51**, 2407-2418, (2010).

- [76] F. I. Lizama-Tzec, J. D. Macías, M. A. Estrella-Gutiérrez, A. C. Cahue-López, O. Arés R. de Coss, J. J. Alvarado-Gil and G. Oskam, Electrodeposition and characterization of nanostructured black nickel selective absorber coatings for solar–thermal energy conversion, *J Mater Sci: Mater Electron*, **26**(8) 5553–5561, (2014).
- [77] X. Zhao y Z. Li, Numerical and experimental study on free convection in air layers with one surface V corrugated, *Proceeding of the annual meeting of the Chinese Society of Solar Energy*, 182-192, (1991).
- [78] K. S. Ong, Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure, *Solar Energy*, **55**(2), 93-109, (1995).
- [79] W. McAdams, *Heat transmission*, 3rd ed ed., New York: McGraw-Hill, (1954).
- [80] L. Li y X. Zhao, Studies on the methods of the testing of the thermal performances of solar air collectors, *Proceedings of the annual meeting of the Chinese Society of Solar Energy*, 149-55., (1991).
- [81] X. Zhai, Y. Dai and R. Wang, Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors, *App Therm Eng*, **25**, 741–57., (2005).
- [82] R. Weast, *Handbook of tables for applied engineering science*, Boca Raton: CRC Press, (1970).
- [83] NMX, *Alimentos. Determinación de humedad en productos alimenticios.*, 083, (1986).
- [84] M. W. Browne and R. Cudeck, Testing structural equation models, de *Alternative ways of assessing model fit*, Long, Ed., Newbury Park, NJ, In K. Bollen & S1ª ed Sage, 136-162,(1993).
- [85] S. Taghian Dinani, N. Hamdamib, M. Shahedi and M. Havet , Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics kinetics of mushroom slices, *Energy Conversion and Management*, **86**, 70-80, (2014).

- [86] A. Abbas, Solchrome solar selective coatings-an effective way for solar water heaters globally, .Renew Energy, **19**, 145-54, (2000).
- [87] J. H. Lee and H. J. Kim, Vacuum drying characteristics of asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices, LWT – Food Sci Technol, **42**(1), 180-186, (2009).
- [88] H. W. Xiao, C. L. Pang, L. H. Wang, J. W. Bai, W. X. Yang and Z. Gao, Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer, Biosyst Eng. **105**, 233-240, (2010).
- [89] A. Koukouch, A. Idlimam , M. Asbik, B. Sarh, B. Izrar, S. Bostyn, A. Bah, O. Ansari, O. Zegaoui, A. Amine, Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste, Renewable Energy, **101**, 565-574, (2017).
- [90] M.-H. Nguyen and W. E. Price, Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season, Journal of Food Engineering, **79**, 200-2007, (2007).
- [91] R. Thuwapanichayanan, S. Prachayawarakorn and K. Jaruwat, Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying, LWT - Food Science and Technology, **44**, 1502-1510, (2011).
- [92] M. U. Joardder, A. Karim, C. Kumar and R. J. Brown, Determination of effective moisture diffusivity of banana using Thermogravimetric analysis, Procedia Engineering, **90**, 538-543, (2014).
- [93] R. Bains and T. Langrish, An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas, Journal of Food Engineering, **85**, 201-214, (2008).
- [94] R. Nogueira and K. J. Park, Drying parameters to obtain 'bananapassa', de In Proceedings of the 8th international drying symposium, Part A, Montreal, Canada., (1992).
- [95] N. Zogzas, Z. Maroulis y D. Marinos-Kouris, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs, Drying Technology, **14**, 2225-2253, (1996).

- [96] T. P. Krishna-MurthyBalara and B. Manohar, Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network, *Journal of Food Science and Technology*, **51**, 12, (2014).
- [97] I. Doymaz and O. Ismail, Drying characteristics of sweet cherry, *Food and Bioproducts Processing*, **89**, 31-38, (2011).
- [98] M. W. Browne and R. Cudeck, Alternative ways of assessing model fit, *Testing structural equation models*, Long, Ed., Newbury Park, NJ: In K. Bollen & S1^a ed Sage, 136-162, (1993).

México.

de Tabasco.

Modelado, simulación y caracterización de un secador solar para estudiar la cinética de secado de productos agrícolas en Tabasco.

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	revistas.ujat.mx Internet	1141 palabras — 7%
2	xdoc.mx Internet	355 palabras — 2%
3	dehesa.unex.es:8080 Internet	344 palabras — 2%
4	www.cenidet.edu.mx Internet	243 palabras — 1%
5	www.scribd.com Internet	217 palabras — 1%
6	hdl.handle.net Internet	53 palabras — < 1%
7	repositorio.unicach.mx Internet	49 palabras — < 1%
8	es.scribd.com Internet	38 palabras — < 1%
9	ninive.ismm.edu.cu Internet	38 palabras — < 1%

10	www.scielo.cl Internet	33 palabras — < 1%
11	sedici.unlp.edu.ar Internet	30 palabras — < 1%
12	web10.unl.edu.ar:8080 Internet	30 palabras — < 1%
13	repositorio.unan.edu.ni Internet	29 palabras — < 1%
14	docplayer.es Internet	26 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 20 PALABRAS