



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA EN SECADO
POR VENTANA DE REFRACTANCIA EN
MESOCARPIO DE SANDÍA Y TOMATE”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

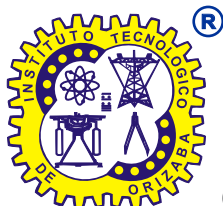
I.Q. Karla Yoali Sánchez Andrade

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Rosalía Cerecero Enríquez

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Manuel Tejero Andrade



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2024



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 27/noviembre/2024

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
Opción: I

**C. KARLA YOALI SÁNCHEZ ANDRADE
CANDIDATA A GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA EN SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA EN
MESOCARPIO DE SANDÍA Y TOMATE”**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA ®



**OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 20/agosto/2024
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis de la C.

KARLA YOALI SÁNCHEZ ANDRADE

La cual lleva el título de:

**MODELACIÓN MATEMÁTICA EN SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA
EN MESOCARPIO DE SANDÍA Y TOMATE**

Y concluyen que se acepta.

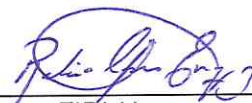
ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA®

PRESIDENTE: DRA. ROSALIA CERECERO ENRÍQUEZ

SECRETARIO: DR. JOSÉ MANUEL TEJERO ANDRADE

VOCAL: DRA. LETICIA LÓPEZ ZAMORA

VOCAL SUP.: DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO


FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: dir_orizaba@tecnm.mx technm.mx | orizaba.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, que ha estado conmigo en cada etapa de mi vida y me ha apoyado con su palabras y comprensión durante la maestría. Gracias por tu amor incondicional y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles. Tus sacrificios, tu paciencia y tu constante fe en mí me han dado la fuerza para llegar hasta aquí.

A mi abuela, Mamá Lupe, que me apoyo con sus consejos y apoyo en estos tiempos, por los momentos que hemos vivido en estos últimos meses en especial. Gracias por todo lo que has hecho por nosotros para que podamos avanzar.

A mi familia, en especial a mis hermanos y mi abuelo, Papá Toño, que fueron un pilar de apoyo en este periodo, y que estuvieron conmigo en cada momento de mi vida, al igual que mi papá. A todas mis amigas, Diana, Ana, Arely, Ale, Gaby, Kari, Miriam, Ismari, Celeste, Diani, Brenda y mis hermosas puerks, gracias por darme sus palabras de aliento y su cariño cuando más lo necesite, de escuchar mis lamentos y animarme a superarme.

A NCT y a Doyoung, que ha sido una luz en mi vida desde 2016, tu música y dedicación por lo que haces, me hacen querer alcanzar mis metas y ser una mejor persona. Gracias por ser un ejemplo de constancia y por recordarme, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y corazón.

RECONOCIMIENTOS

A mis asesores, la Dra. Rosalía Cerecero Enríquez y al Dr. José Manuel Tejero Andrade, mi más sincero agradecimiento por su invaluable orientación y apoyo a lo largo del proceso del presente trabajo. Su paciencia, dedicación y conocimientos me han permitido crecer tanto académica como personalmente. Gracias por compartir su experiencia y por estar siempre dispuestos a ofrecerme sus consejos.

A la Dra. Leticia López Zamora, Dra. Guadalupe Luna Solano y Dr. Gerardo Aguila Rodríguez por haberme brindando su apoyo al abrirme las puertas de su laboratorio y compartir de sus conocimientos, además de su tiempo y orientación.

A CONAHCYT por el apoyo otorgado con la beca No. 1180050 en el período de investigación.

RESUMEN

Modelación matemática en secado por ventana de refractancia en mesocarpio de sandía y tomate

Elaborada por: Ing. Karla Yoali Sánchez Andrade

Dirigida por: Dra. Rosalía Cerecero Enríquez

Dr. José Manuel Tejero Andrade

El secado es una técnica de conservación en alimentos climatéricos como frutas y verduras, que representan una gran cantidad de alimentos desperdiciados en México. Este tratamiento térmico, favorece el desarrollo de componentes químicos, como el licopeno, comprobado a través de diversos métodos, como FT-IR. Además, el secado puede retardar reacciones químicas asociadas al deterioro enzimático, como la reacción de Maillard.

Dado lo anterior, en este proyecto se evaluó el secado por ventana de refractancia (SVR) y de charolas (SCH) en sandía (*Citrullus lanatus*) y tomate (*Solanum lycopersicum*), con el propósito de modelar el proceso y validar la retención de compuestos de aporte nutricional. Tanto la sandía como al tomate fueron tratados para obtener el mesocarpio de la sandía (blanco) y pulpa de tomate, se realizaron análisis fisicoquímicos de pH, densidad, humedad, sólidos totales, a_w y color, además de realizarse la determinación de fitoquímicos como licopeno, polifenoles, antocianinas y carotenoides. El secado por ventana de refractancia se realizó a 65, 75 y 85°C, en tanto que, el secado por bandejas a 50, 60 y 70°C, con espesor de rodaja 3, 5 y 7 mm. El análisis de humedad y retención de compuestos permitió utilizar correlaciones termodinámicas para determinar los coeficientes de capacidad calorífica (C_p), conductividad térmica (λ), difusividad efectiva (D_{eff}) y energía de activación (E_a). Por otro lado, se analizaron los modelos matemáticos como Lewis, Page y Weibull para obtener datos estadísticos que permitieran identificar el mejor ajuste. El modelo de Page mostró mejor ajuste en sandía deshidratadas al obtenerse R^2 de 0.8789 a 0.9272 en muestras tratadas por charolas y $0.8680 < R^2 < 0.8334$ en las muestras deshidratadas por ventana; por otro lado, en tomate se

obtuvieron ajustes de 0.8789 a 0.9272 en los modelos de Lewis, Page y Weibull para charolas, mientras que, por VR, los mejores ajustes fueron los obtenidos con Page y Lewis con un R^2 de 0.8687 a 0.9174. *A posteriori*, se analizaron las muestras a través de FT-IR, destacando en mesocarpio de sandía, mostrando crestas para λ de 1000-1200, 1400 y 3200-3700 cm^{-1} , correspondientes a grupos funcionales de carotenoides, licopeno y polifenoles respectivamente, en muestras tratadas por SVR y SCH, con una ligera mayor amplitud en muestras por SVR. Finalmente, a través de imágenes de microscopía óptica de los frutos, se analizó la morfología con el software ImageJ.

El secado por ventana de refractancia resulta ser un método viable para la conservación de alimentos climatéricos como la sandía y tomate al reducir tiempos de secado, mejor calidad en el alimento, además de comprobarse mayor retención de compuestos fenólicos y carotenoides.

ABSTRACT

Mathematical modeling of refractance window drying in watermelon rind and tomato.

Prepared by: Ing. Karla Yoali Sánchez Andrade

Directed by: Dr. Rosalía Cerecero Enríquez

Dr. José Manuel Tejero Andrade

Drying is a preservation technique for climacteric foods such as fruits and vegetables, which represent a large amount of wasted food in Mexico. This thermal treatment favors the development of chemical components, such as lycopene, which has been proven through various methods, such as FT-IR. In addition, drying can delay chemical reactions associated with enzymatic deterioration, such as the Maillard reaction.

Therefore, this project evaluated the refractory window drying (RWD) and tray drying (RWD) of watermelon (*Citrullus lanatus*) and tomato (*Solanum lycopersicum*), with the purpose of modeling the process and validating the retention of nutritional compounds. Both watermelon and tomato were treated to obtain watermelon mesocarp (white) and tomato pulp, and physicochemical analyses of pH, density, moisture, total solids, a_w and color were performed. In addition to the determination of phytochemicals such as lycopene, polyphenols, anthocyanins and carotenoids. Refractory window drying was carried out at 65, 75 and 85°C, and tray drying at 50, 60 and 70°C with slice thicknesses of 3, 5 and 7 mm. The analysis of moisture and retention of compounds allowed the use of thermodynamic correlations to determine the coefficients of heat capacity (Cp), thermal conductivity (λ), effective diffusivity (D_{eff}) and activation energy (E_a). On the other side, mathematical models such as Lewis, Page and Weibull were analyzed to obtain statistical data to identify the best fit. The Page model showed better fit in dehydrated watermelon by obtaining R^2 from 0.8789 to 0.9272 in samples treated by trays and $0.8680 < R^2 < 0.8334$ in samples

dehydrated by window; on the other hand, in tomato, adjustments were obtained from 0.8789 to 0.9272 in the Lewis, Page and Weibull models for trays, while, for VR, the best fits were obtained with Page and Lewis with an R^2 of 0.8687 to 0.9174. A posteriori, samples were analyzed through FT-IR, standing out in watermelon mesocarp, showing peaks for λ from 1000-1200, 1400 and 3200-3700 cm^{-1} , corresponding to carotenoid, lycopene and polyphenol functional groups respectively, in samples treated by SVR and SCH, with a slightly higher amplitude in samples by SVR. Finally, through optical microscopy images of the fruits, morphology was analyzed with ImageJ software.

Drying by refractance window turns out to be a viable method for the preservation of climacteric foods such as watermelon and tomato by reducing drying times, improving food quality, and proving greater retention of phenolic compounds and carotenoids.

ÍNDICE

	Pág
Resumen	ii
Abstract	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xi
Nomenclatura	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: Fundamentos Teóricos	4
1.1 Generalidades de la Sandía (<i>Citrullus lanatus</i>).....	4
1.1.1 Propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas en Sandía.....	5
1.2 Generalidades del Tomate	6
1.2.1 Composición nutricional.....	7
1.2.2 Propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas en Tomate	8
1.3 Secado	9
1.3.1 Mecanismos de transferencia en el secado	10
1.3.2 Variables que influyen en el secado	14
1.3.3 Secado por charolas	15
1.3.4 Secado por ventana de refractancia (VR)	17
1.3.5 Propiedades fisicoquímicas y físicas de los alimentos	18
1.3.6 Propiedades térmicas de los alimentos.....	20
1.3.7 Modelación matemática en el proceso del secado	24
1.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	27
1.4.1 Mecanismo utilizado en equipos FTIR	28
1.5 Diseño de experimentos	30
1.5.1 Diseño factorial 2 ³	30
1.6 Antecedentes	30
1.7 Avances.....	32
CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos	35
2.1 Desarrollo experimental del proyecto	35
2.1.1 Selección de materia prima.....	36
2.1.2 Obtención del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.....	36
2.2 Análisis fisicoquímico	36

2.2.1 Determinación de pH	36
2.2.2 Determinación de densidad	37
2.2.3 Determinación del porcentaje de humedad.....	37
2.2.4 Determinación de sólidos totales	38
2.2.5 Determinación de actividad de agua (<i>aw</i>).....	38
2.2.6 Determinación de color	38
2.3 Análisis bromatológicos	39
2.3.1 Determinación de polifenoles.....	39
2.3.2 Determinación de licopeno	39
2.3.3 Determinación de antocianinas.....	40
2.3.4 Determinación de carotenoides	41
2.4 Condiciones del secado por charolas y ventana de refractancia (VR)	42
2.5 Modelación matemática	43
2.5.1 Cálculo de variables	43
2.5.2 Cálculo de difusividad efectiva.....	43
2.5.3 Modelación de secado de charolas.....	44
2.6 Espectroscopía FTIR	45
2.7 Diseño experimental: diseño factorial 2 ³	46
CAPÍTULO 3: Resultados y Discusión	48
3.1 Determinaciones fisicoquímicas.....	48
3.1.1 Humedad en tomate y sandía	49
3.1.2 Colorimetría en mesocarpio de sandía y tomate.	50
3.1.3 Bromatología en mesocarpio de sandía y tomate.	53
3.2 Determinación de coeficientes y modelado matemático.....	54
3.2.1 Cinéticas de secado en mesocarpio de sandía y tomate.	55
3.2.2 Modelación matemática.....	61
3.2.3 Coeficientes de transferencia.....	64
3.3 Retención de compuestos.....	67
3.4 Obtención de imágenes	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
Anexos.....	79
Referencias Bibliográficas.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág
1.1 Morfología de sandía	4
1.2 Morfología de tomate (Infogronomo, 2018)	6
1.3 Pérdida de peso del producto durante el proceso de secado. (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2002)	12
1.4 Etapas en el proceso de secado a velocidad constante y decreciente (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2002)	13
1.5 Diagrama de secador de charolas (Badui, 2006)	16
1.6 Diagrama de secado de bandejas con sistemas de vacío (Singh y Heldman, 2001)	16
1.7 Esquema de secador de ventana de refractancia continuo (Ortiz, 2014)	18
1.8 Espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier de un solo haz	29
1.9 Espectro infrarrojo	29
2.1 Diagrama general de la modelación matemática del secado por VR en sandía y tomate	35
2.2 (a) Pulpa de sandía y mesocarpio de sandía, (b) rodajas de tomate y mesocarpio de sandía	36
2.3 Medidor de actividad de agua VTS-160A	38
2.4 Baño térmico	42
2.5 Equipo de ventana de refractancia modificado	42
2.6 Secador de bandejas Hamilton Beach 32100	43
2.7 FT-IR Nicolet iS5	45
3.1 Gráfica de humedad vs temperatura (a) y gráfica de a_w vs temperatura en mesocarpio de sandía (b)	50

3.2	Gráfica de humedad vs temperatura (a) y gráfica de a_w vs temperatura en tomate (b)	50
3.3	Coordenadas de colorimetría (X-Rite, 2023)	51
3.4	(a) Diseño de cabina de metacrilato en secador de ventana de refractancia con medidas y (b) diseño de secado con ventana de refractancia a escala 1:10	55
3.5	Gráfica de secado VR en pulpa de mesocarpio de sandía: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm	56
3.6	Gráfica de secado VR con cabina en mesocarpio de sandía: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm	57
3.7	Gráfica de secado de charolas en mesocarpio de sandía: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm	58
3.8	Gráfica de secado VR en pulpa de tomate: con espesor de (a) 3 mm, (b) con espesor de 5 mm y (c) con espesor de 7 mm	59
3.9	Gráfica de secado VR con cabina de pulpa de tomate: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm	60
3.10	Gráfica de secado de charolas en tomate: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm	61
3.11	Gráfica de difusividad efectiva vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate	64
3.12	Gráfica de energía de activación vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate	65
3.13	Gráfica de capacidad calorífica vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate	66
3.14	Gráfica de conductividad térmica vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate	66
3.15	Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado VR sin cabina	68
3.16	Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado VR con cabina	69
3.17	Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado de charolas	71
3.18	Espectro FT-IR de tomate por secado VR sin cabina	72

3.19	Espectro FT-IR de tomate por secado VR con cabina	73
3.20	Espectro FT-IR de tomate por secado de charolas	74
3.21	Morfología de mesocarpio de sandía (a) fresco y (b) deshidratado a través de ImageJ	75
3.22	Morfología de mesocarpio de tomate (a) fresco y (b) deshidratado a través de ImageJ	76

LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág
1.1	Valor nutricional en 100 g de sandía (USDA, 2019)	5
1.2	Valor nutricional en 100 g de tomate (USDA, 2019; Latham, 2002)	8
1.3	Trabajos de modelación matemática	25
1.4	Modelos matemáticos utilizados en el secado (Villalba-Vidales y Arzola-de la Peña, 2015)	27
2.1	Diseño factorial del secado de ventana de refractancia y charolas	46
3.1	Resultados del análisis fisicoquímico en mesocarpio de sandía y tomate frescos	48
3.2	Colorimetría en mesocarpio de sandía deshidratado por secado VR	51
3.3	Colorimetría en mesocarpio de sandía deshidratado por secado de charolas	52
3.4	Colorimetría en tomate deshidratado por secado VR	52
3.5	Colorimetría en tomate deshidratado en secado de charolas	53
3.6	Resultados de análisis bromatológicos de sandía y tomate	54

NOMENCLATURA

Abreviatura	Descripción	Unidades
A	Absorbancia	-
a_w	Actividad de agua	-
Cp	Capacidad térmica	kJ/(kg K), J/(kg°C)
C*	Chroma	-
ϵ	Coeficiente de extensión molar	-
h	Coeficiente de transferencia de calor	W/(m ² °C)
a	Coordenadas rojo/verde	-
b	Coordenadas amarillo/azul	-
K	Conductividad térmica	W/(m K)
R	Constante universal de los gases	Jmol ⁻¹ • K ⁻¹
CH _{bn}	Contenido de humedad base húmeda	-
CH _{bs}	Contenido de humedad base seca	-
ρ	Densidad	g/L, kg/m ³
ΔE	Diferencia de color	-
D_e	Difusividad efectiva	m ² /s
D_{eff}	Difusividad efectiva de humedad	m ² /s
α	Difusividad térmica	m ² /s
E _a	Energía de activación	J/mol
σ_c	Factor de constricción	-
FD	Factor de dilución	-
D _o	Factor pre exponencial	-
X	Fracción másica	-
	Contenido de humedad	-
h^*	Hue	-
M	Humedad	-
l	Espesor	cm,
L	Luminosidad	-
	Largo de la celda	cm
M370	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 70°C	-
M570	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 70°C	-
M770	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 70°C	-
M360	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 60°C	-
M560	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 60°C	-
M760	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 60°C	-
M350	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 50°C	-
M550	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 50°C	-
M750	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 50°C	-
T370	Muestra de 3 mm de tomate a 70°C	-
T570	Muestra de 5 mm de tomate a 70°C	-
T770	Muestra de 7 mm de tomate a 70°C	-
T360	Muestra de 3 mm de tomate a 60°C	-
T560	Muestra de 5 mm de tomate a 60°C	-
T760	Muestra de 7 mm de tomate a 60°C	-

T350	Muestra de 3 mm de tomate a 50°C	-
T550	Muestra de 5 mm de tomate a 50°C	-
T750	Muestra de 7 mm de tomate a 50°C	-
M385	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 85°C	-
M585	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 85°C	-
M785	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 85°C	-
M375	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 75°C	-
M575	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 75°C	-
M775	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 75°C	-
M365	Muestra de 3 mm de mesocarpio de sandía a 65°C	-
M565	Muestra de 5 mm de mesocarpio de sandía a 65°C	-
M765	Muestra de 7 mm de mesocarpio de sandía a 65°C	-
T385	Muestra de 3 mm de tomate a 85°C	-
T585	Muestra de 5 mm de tomate a 85°C	-
T785	Muestra de 7 mm de tomate a 85°C	-
T375	Muestra de 3 mm de tomate a 75°C	-
T575	Muestra de 5 mm de tomate a 75°C	-
T775	Muestra de 7 mm de tomate a 75°C	-
T365	Muestra de 3 mm de tomate a 65°C	-
T565	Muestra de 5 mm de tomate a 65°C	-
T765	Muestra de 7 mm de tomate a 65°C	-
PM	Peso molecular	-
ϕ_p	Porosidad de la partícula	-
R	Tasa de evaporación	-
t	Tiempo	s, min, h
τ	Tortuosidad	-
V	Volumen	L, mL,

INTRODUCCIÓN

México ha destacado en la producción y exportación a nivel internacional de diversas frutas y hortalizas, como la sandía y el tomate, ambos de gran demanda económica (SADER, 2021; Montaña-Méndez *et al.*, 2021). Sin embargo, en el país se desperdicia 34.5% (20.3 millones de T) en las etapas de la cadena de suministro alimentario (López-Sánchez *et al.*, 2021).

La sandía (*Citrullus lanatus*), cuenta con más de 50 variedades (Liu *et al.*, 2022), cuya clasificación está en función de diversos factores como forma, tamaño, periodo de maduración, etc., constituida por pulpa roja, semillas y cáscara con película en tonalidad verde y pulpa blanca (mesocarpio), la cual contiene carbohidratos, fibra, proteína, minerales (Fe, Mg, K, P y Ca) y vitamina C, en menor cantidad compuestos fenólicos, licopeno, citrulina y agua (95 %), distribuidos en las diferentes partes de la sandía. En tanto que, la hortaliza tomate (*Solanum lycopersicum*), contiene licopeno (0.88-7.74 mg/100g) y vitamina C (22.9 mg/100 g), además es una fuente de minerales como K (427 mg/82 g) y Mg (20 mg/82 g). Tanto fruta como hortaliza aportan fitoquímicos a la dieta, licopeno compuesto bioactivo asociado con la reducción de varias enfermedades cardíacas, o algunos tipos de cáncer (*v.gr.* cáncer de próstata), mientras que los polifenoles en sandía se encuentran distribuidos en el mesocarpio con valores de 0.38 ± 0.002 a 0.57 ± 0.002 mg/L (Augustia *et al.*, 2020), en tomate se encuentra 8.69 ± 0.19 µg/g (Jin *et al.*, 2022).

Mediante la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la sandía y del tomate al natural y deshidratado, empleando técnicas para humedad, sólidos totales, densidad, pH, color; la determinación de los coeficientes de transferencia de masa en rodajas de tomate y en sandía durante el secado por ventana de refractancia y así como la validación un modelo matemático de los modelos utilizados en bibliografía, la evaluación la retención de polifenoles y licopeno en muestras deshidratadas de sandía y tomate en secado por ventana de refractancia como en charolas., así como la caracterización la morfología del producto deshidratado mediante imágenes.

Dado lo anterior se propone la modelación del secado por ventana de refractancia del mesocarpio de sandía y tomate en la retención de compuestos fenólicos. Para esto, se ha estudiado diferentes métodos de secado, tanto el más utilizado en la industria por la baja inversión económica como es el secado por convección forzada (bandejas), así como, el secado por ventana de refractancia (VR) en alimentos termosensibles, reportando una mayor retención de biocompuestos de interés nutricional y económico. Se evaluaron las respuestas termodinámicas del ensayo experimental a nivel laboratorio, para predecir el comportamiento de ambos alimentos durante el secado por VR, y determinar la retención de polifenoles.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Generalidades de la Sandía (*Citrullus lanatus*).

La sandía (*Citrullus lanatus*) pertenece a la familia de plantas *Cucurbitacea*. En la actualidad, es posible la cosecha de este fruto durante todo el año gracias al uso de invernaderos, los cuales cuentan con las condiciones adecuadas para el crecimiento del cultivo (FAO, 2002). En la Figura 1.1 se puede apreciar la morfología de la sandía, la cual está formada por semillas, endocarpio o placenta (pulpa del fruto), epicarpio (corteza) y mesocarpio (parte blanca entre la corteza y la pulpa). Genéticamente, existen dos tipos de sandía:

- I. Sandías diploides o con semillas: cultivadas tradicionalmente, suelen tener semillas negras y cáscara de color verde oscuro.
- II. Sandías triploides o sin semillas: variedades que tienen semillas blancas, casi imperceptibles al consumirse. Su corteza suele ser verde claro con rayas verdes oscuras.

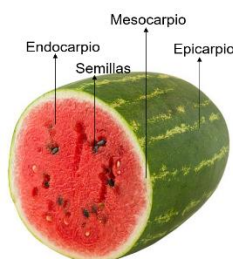


Figura 1.1 Morfología de sandía

En 2020, se tuvo una producción de 1,357,000 toneladas, logrando ser el 10º productor a nivel internacional de este fruto, además de exportar 733 mil toneladas a Estados Unidos, Canadá, Cuba y Japón, representando un ingreso de 149.758,000 dólares (SADER, 2021). La cosecha de sandía se lleva a cabo en todo el país, estados como Sonora, Jalisco, Chihuahua y Veracruz destacan con porcentajes de participación en su producción, con 30, 9.8, 9.5 y 7.6%, respectivamente (SIAP, 2022).

1.1.1 Propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas en Sandía

En la Tabla 1.1. se presenta el valor nutricional y otros compuestos de la Sandía. De igual manera, tiene la presencia fitoquímicos como los alcaloides, flavonoides, glúcidos, saponinas, taninos, carotenoides sin actividad provitamínica, donde el licopeno, de acuerdo con estudios, reduce los niveles de colesterol sanguíneo e inhibir la oxidación de la fracción LDL-colesterol (Dubey *et al.*, 2022, Inoue *et al.*, 2021). El consumo de alimentos con licopeno ayuda a la protección de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer, como: cérvix, próstata, pulmón, mama y tracto digestivo (Tigcilema-Toca, 2020), al igual que la cucurbitacina, que funciona además como agente antiinflamatorio (Dubey *et al.*, 2022)

Tabla 1.1 Valor nutricional en 100 g de sandía (USDA, 2019).

Componente	Porción en 100 g
Agua (g)	91.4
Energía (kcal)	30
Proteína (g)	0.61
Carbohidratos (g)	7.55
Fibra dietética total (g)	0.4
Azúcares totales (g)	6.2
Calcio (mg)	7
Fierro (mg)	0.24
Magnesio (mg)	10
Potasio (mg)	112
Fósforo (mg)	11
Vitamina C (mg)	8.1

Por otra parte la citrulina, aunque es un aminoácido no esencial en el humano, es producida de manera natural y desempeña como antioxidante y eliminador de radicales libres, encontrándose tanto en la pulpa como en la corteza de la sandía

(Valle-Vargas *et al.*, 2020), se menciona en literatura menciona que en la corteza de sandía contiene mayor concentración de citrulina.

1.2 Generalidades del Tomate

La planta del tomate tiene un sistema radicular pivotante, profundo y poco ramificado (SAGARPA, 2017). Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo pueden presentarse dificultades, como temperaturas bajas, días cortos, falta de humedad, estrés hídrico, salinidad, entre otras (FAO, 2002). El fruto, identificado comúnmente como tomate rojo y jitomate (SIAP, 2022), pertenece a la familia de las solanáceas (*Solanaceae*). En la Figura 1.2, se observa la morfología del tomate, conteniendo epicarpio, mesocarpio y endocardio carnosos, los cuales envuelven al lóculo, placenta y semillas.

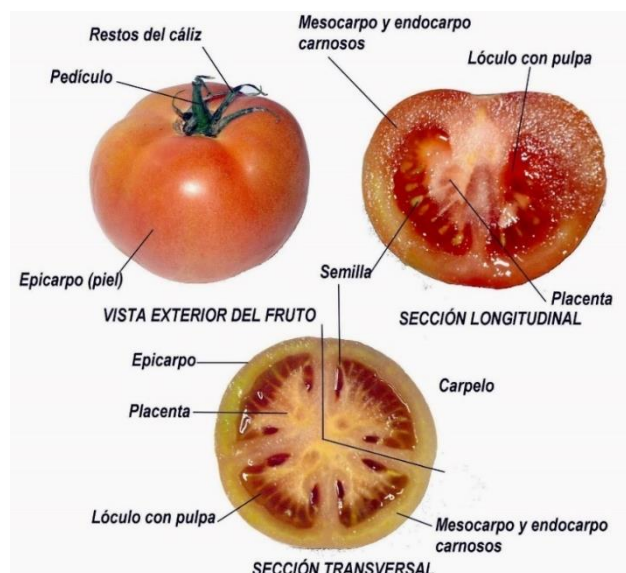


Figura 1.2 Morfología de tomate (Infoagronomo, 2019).

Según Hemalatha *et al.* (2021) existen dos variedades de tomate de acuerdo con su hábito de crecimiento, las determinadas, las cuales son de periodos cortos y de fácil mantenimiento, y las indeterminadas cuyas variedades son pequeñas (*v.gr.* tomate cherry), además de requerir de invernaderos. La calidad del fruto es de importancia para su uso y se evalúa a través de las siguientes características:

- I. Compacidad o consistencia del suelo: según las condiciones de cultivo.

- II. Coloración: debe tener la mayor homogeneidad en el alimento. En el producto, no es exclusivo el color rojo, dado que hay variedades de color amarillo, rosado, carmesí y rojo oscuro.
- III. Sabor: depende esencialmente del contenido en ácidos y azúcares, en este caso, se requiere que el pH sea inferior a 4.4 y un contenido en azúcares totales superior a 4-4.5%. Cuando el alimento se expone a temperaturas de 30 a 35°C, la acidez puede ser inferior.
- IV. Actividad de enzimas: temperaturas superiores a los 20°C pueden ocasionar daños enzimáticos a un ritmo acelerado a los frutos en estado de madurez avanzado.

1.2.1 Composición nutricional

Es una hortaliza cuyo consumo ayuda a la prevención de diversas enfermedades debido a la presencia de nutrientes como vitaminas, mostradas en la Tabla 1.2. El contenido puede variar de acuerdo con la variedad y las condiciones durante el proceso, es decir, desde la producción hasta comercialización y consumo, y que pueden influir sobre el contenido de caroteno o de vitamina A (FAO, 2002).

Si bien diversas frutas y hortalizas tienen en su composición la presencia de carotenoides y xantofilas en diferentes proporciones, el tomate contiene más del primer compuesto, principalmente de licopeno (encargado de dar el color rojo en los alimentos), además puede contener cantidades limitadas de β y α -caroteno.

Las condiciones climáticas son una ventaja para la producción, en la actualidad, existen invernaderos diseñados para satisfacer y controlar las condiciones del medio ambiente durante el proceso (Ghasemi-Maham *et al.*, 2020). El tomate se cultiva en ciclo “corto” y “largo”, es decir, tanto en primavera (considerado como el periodo principal), o en temporadas frías como otoño (en su ciclo corto). De acuerdo con la variedad del tomate, puede variar el ciclo en el cual se puede cultivar (FAO, 2002).

A nivel internacional, México aportó un 1.7% de la producción mundial de tomate, y exportó 19% a países como Estados Unidos y Japón, generando un aproximado de 14

759 millones de pesos al año (Montaño-Méndez *et al.*, 2021). Veracruz es el 9º productor a nivel nacional, con 2.1% de la producción nacional en 2022.

Tabla 1.2 Valor nutricional en 100 g de tomate (USDA, 2019; Latham, 2002).

Componente	Porción en 100 g
Agua (g)	92.4
Energía (kcal)	31
Nitrógeno (g)	0.13
Proteína (g)	0.83
Carbohidratos (g)	
Carbohidratos por diferencia (g)	5.51
Fibra dietética total (g)	2.1
Vitamina A (µg)	113
Vitamina C (mg)	27.2
Vitamina B-6 (mg)	0.6
Licopeno (µg)	4100

1.2.2 Propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas en Tomate

Badui (2006) define a los carotenoides como pigmentos naturales encontrados en el reino vegetal y animal, cuyos colores abarca desde el amarillo hasta el rojo intenso. Estos pigmentos pertenecen a la clase de los polienos, y su presencia explica el color intenso en múltiples alimentos a base de agua, o en sustitutos cárnicos tanto para el humano como en animales (para mejorar su aspecto). El consumo de alimentos enriquecidos con licopeno puede ser benéfico para la salud, dado que previene la oxidación del LDL, además de reducir el riesgo de desarrollar enfermedades coronarias, o arterosclerosis.

Por otro lado, Castro (2021) cita a los polifenoles como agrupaciones de compuestos bioactivos generalmente encontrados en alimentos de origen vegetal. Se clasifican en cuatro grupos: flavonoides, ácidos fenólicos, lignanos y estilbenos. Dentro de los flavonoides, se puede encontrar las antocianinas, compuestos vegetales no

nitrogenados responsables de la coloración en productos como uvas, manzanas, rosas, fresas, entre otros, y si bien su uso como colorantes no ha sido formalizado debido a su difícil purificación, pueden emplearse en algunos productos deshidratados para proporcionar color.

El interés en estas moléculas radica en la aportación que hacen al cuerpo humano, por ejemplo, los polifenoles se ven involucrados en la inhibición de la acetilcolinesterasa y disminución de producción de especies reactivas del oxígeno, que, tiene efectos cardio y/o vasoprotectores sobre las células endoteliales (Otręba *et al.*, 2020).

Existen métodos para el analizar y detectar la presencia de estos compuestos en los alimentos, desde determinaciones cuantitativas hasta el uso de equipos y softwares, un ejemplo de ellos es la espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), la cual se caracteriza por la lectura de las longitudes de onda de los enlaces químicos de las muestras, que son absorbidas por la onda infrarroja según las estructuras de las moléculas que posean (Mata-Miranda *et al.*, 2017), formando una huella digital, para finalmente obtener la identificación de materias primas o materiales desconocidos que puedan estar contenidas en la muestra sólida o líquida.

1.3 Secado

Esta acción reduce el contenido de agua en el alimento, causante de cualquier degradación enzimática, crecimiento microbiano y reacciones de descomposición (Jafari y Malekjani, 2023). Singh y Heldman (2006) describe al secado en etapas, la humedad es transportada a la superficie del producto y evaporada internamente en la interfase líquido-vapor, transportándose como vapor a la superficie. Gradualmente, el contenido de humedad en la superficie disminuye y la resistencia interna de transporte de agua incrementa. La zona de evaporación promueve una costra o piel, esto significa que el calor aportado para la evaporación ha sido transportado al aire desde la superficie.

Verma *et al.* (2018) y Verma y Srivastav (2020) citan las ventajas del secado, como la utilidad y facilidad para llevarse a cabo a cualquier nivel, la prolongación de la vida de anaquel del producto si cumple con los niveles de humedad residual adecuado, reducción significativa del peso y volumen de muestras, reducción de costos de almacén (sin requerir condiciones especiales), empaque y transporte, además de permitir el abastecimiento de productos durante todo el año.

Las desventajas, pueden reportarse como una baja calidad en los productos en contenido de nutrientes, textura, aroma, etc., además de baja capacidad de rehidratación, de acuerdo al tipo de secado que se utilice. En algunos métodos de secado, los costos de equipamiento en producción a escala industrial pueden ser elevados debido a equipos muy específicos.

Jafari y Malekjani (2023), mencionan el impacto del secado en un aspecto nutricional al incrementar o reducir la concentración de ciertos compuestos, ya sea por la liberación de formas ligadas o la degradación u oxidación a temperaturas elevadas, respectivamente. En frutas y verduras, compuestos antioxidantes, ácidos fenólicos y flavonoides incrementan con la aplicación de diversos métodos de secados.

1.3.1 Mecanismos de transferencia en el secado

Hasan-Masud *et al.* (2020), describen al secado como un proceso simultaneo de transferencia de calor y masa en tránsito en diferentes direcciones donde actúan diferentes mecanismos en transferencia.

Nonhebel y Moss (2002) definen la transferencia de calor como mecanismo predominantemente por convección o conducción, esto es, al suministrarlos, se proveen automáticamente los medios para eliminar el vapor, mientras que, el transporte de calor por radiación no necesita de algún medio físico para su transmisión. La radiación, no depende un material intermediario como portador de energía, sino que se ve impedido por la presencia de material entre regiones. La transferencia simultánea de estos mecanismos, dan pauta al proceso de secado (Verma y Srivastav,

2020). En el proceso, el calor que se suministra al producto (directa o indirectamente) produce la evaporación del agua de la superficie del producto y, posteriormente, continúe con desplazamiento del agua interna hacia a la superficie del producto. Dicha energía es transferida de una región a otra mediante los siguientes mecanismos:

- I. **Conducción:** Mecanismo en el cual la transferencia toma lugar en un nivel molecular. Hay dos teorías, mencionadas por Singh y Heldman (2006) que describen este fenómeno, la primera menciona que, si el material alcanza determinada energía térmica, las moléculas se volverán más activas y tendrán mayor vibración en la estructura molecular de la muestra, todo ello mientras se transmite de una a otra sin movimiento de traslación.
En el otro caso, se afirma que el fenómeno sucede a nivel molecular debido al movimiento de los electrones libres (esto en materiales metálicos, dado que abundan en los mismos)
- II. **Convección:** Este ocurre cuando existe el contacto de un cuerpo con otro, véase, desde un fluido (sea líquido o gas) con un sólido o con alguna superficie, donde habrá un intercambio de calor entre ambos cuerpos, siempre que exista un gradiente de temperaturas. Existen dos tipos de transmisión para este mecanismo, forzada y natural, que dependerá si el flujo es inducido artificialmente o no. La convección forzada implica el uso de un medio mecánico, mientras que la natural sucede gracias a los gradientes de densidades que, a su vez, dependen de los gradientes de temperatura en el sistema.
- III. **Radiación:** La transmisión de calor por radiación se lleva a cabo entre dos superficies mediante la emisión y absorción de ondas electromagnéticas (o fotones), de acuerdo con Singh y Heldman (2001). No necesita un cuerpo o medio para su propagación. Esta transferencia de energía radiante se produce por ondas electromagnéticas portadoras de energía que emiten tanto átomos como moléculas cuando cambia de contenido energético. La cantidad y

características de la energía radiante emitida depende de la naturaleza del material, disposición microscópica y temperatura absoluta (Parsons, 2005).

Durante el proceso del secado, los datos son obtenidos de acuerdo con el peso del producto sobre el tiempo, como se observa en la Figura 1.3, y son expresados en términos de velocidad de secado. Usualmente, se observa un “caída” en las primeras horas del proceso, para después mantener una pérdida constante. La remoción de agua en los productos normalmente se lleva a cabo en una serie de etapas determinadas por las velocidades que se presentan en el proceso, como indican los autores Ibarz y Barbosa-Cánovas, (2002) y mostrado en la Figura 1.4.

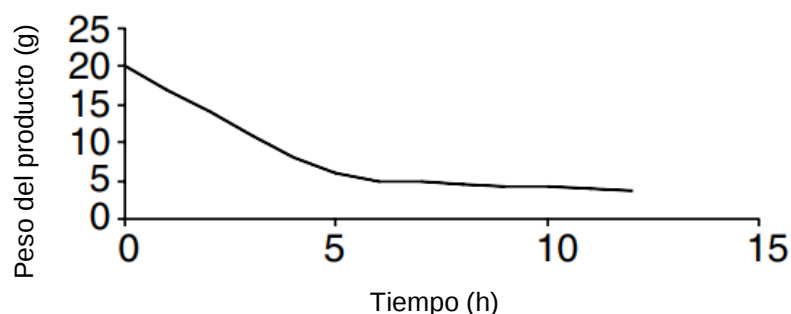


Figura 1.3 Pérdida de peso del producto durante el proceso de secado
(Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2002).

La primera etapa (AB) transcurrirá mientras el contenido de agua en el producto esté ligado en él, es decir, el producto fresco, *a posteriori*, producir una reducción significativa del contenido en agua (BC) para lograr una velocidad de secado constante a temperatura constante. Generalmente, dicha etapa finalizará al alcanzar la humedad crítica, es decir, cuando ocurra un descenso brusco en la pendiente de la curva de humedad, y que puede presentar uno o varios periodos de velocidad de secado decreciente (CD). Por otro lado, durante periodo de descenso de la tasa, la temperatura de la superficie aumenta por encima de la temperatura de bulbo húmedo, siendo perjudicial cuando se deshidrata alimentos, requiriendo mayor cuidado (Singh y Heldman, 2006).

En cuestión de la materia, el secado busca que el producto deshidratado sea más resistente a la degradación microbiana y reacciones bioquímicas degenerativas. Para ello, se han desarrollado nuevas tecnologías de secado para suplir el objetivo del

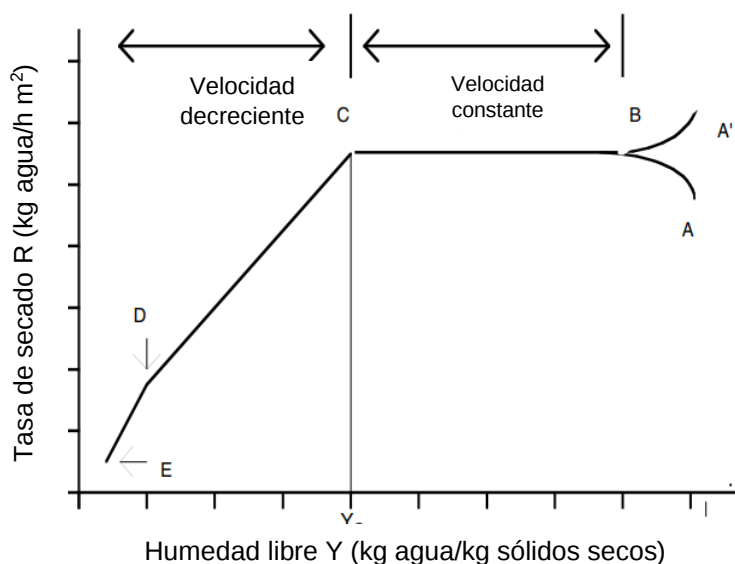


Figura 1.4 Etapas en el proceso de secado a velocidad constante y decreciente (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2002).

proceso, todos ellos con características particulares que ocasionan diferencias en la calidad final del producto, además de buscar ser rentables para garantizar la aceptación del mercado (Mujumdar y Lim, 2010). Vega-Mercado *et al.* (2001) clasificaron las tecnologías de secado en generaciones:

- i. Primera generación. Involucran el uso de aire fluyendo sobre el producto para remover el agua predominante desde la superficie del material. Se suele ocupar en granos, rebanadas y trozos.
- ii. Segunda generación. Métodos de secado diseñados para líquidos, lodos y purés, *v.gr.*: secado de aspersion, de lecho fluidizado y secador de rodillos.
- iii. Tercera generación. Liofilización y secado osmótico son los ejemplos más comunes, usados para conservar estructura y calidad del producto.
- iv. Cuarta generación. Últimos avances en secado, incluye secado al vacío, microondas, radiofrecuencia y ventana de refractancia.

Todo tipo de secado presenta desventajas, por ejemplo, en liofilización, el producto es sometido a largos períodos de tiempo, en secado por aspersión, utiliza altas temperaturas durante el proceso, afectando la calidad del alimento.

1.3.2 Variables que influyen en el secado

El uso inapropiado de los parámetros puede causar pérdidas de la calidad y de los componentes nutritivos del producto durante el proceso, por ello, se requieren de condiciones de operación óptimas que darán la consistencia requerida en el producto final (Kumar *et al.*, 2021). Entre las variables se encuentran:

i. Temperatura del aire

El aumento de la temperatura con la reducción de la circulación del aire puede controlar la velocidad de secado, dado que existe un aumento en la capacidad para retener la humedad del aire, logrando así que la difusión de la humedad sea mayor en el producto. Es decir, que una temperatura del aire uniforme, pero adecuada a lo largo del proceso, garantiza la calidad del producto final.

ii. Humedad relativa

Esta puede reducirse al aumentar la temperatura del bulbo seco del aire para evaporar la humedad del material.

iii. Velocidad del flujo del aire

La velocidad máxima posible de secado en condiciones de temperatura constante se obtiene mediante la rápida circulación del aire a través de la superficie del material, logrando la eliminación de la humedad por evaporación debido al flujo de aire más rápido.

No siempre se recomienda una velocidad de secado alta, dado que provoca mayores tensiones que dañan al producto (agrietamientos o deformaciones). La baja eficiencia (externa) de la transferencia de calor no es un problema si el flujo interno de la humedad es la limitación clave para el movimiento de la humedad.

iv. Tiempo de secado

El incremento en la temperatura provoca una disminución del tiempo requerido para el secado, es decir, si se tiene un gradiente superior de humedad y calor, la velocidad será mayor. Cada tipo de material tendrá una curva de velocidad de secado, debido a diferentes factores, como su composición, etc. Tiempos de secado prolongados hasta la humedad final, provocan un grave deterioro de la calidad en el color, la composición nutricional y la estructura organizativa (Kumar *et al.*, 2021).

v. Actividad de agua (a_w)

Los microorganismos necesitan agua con un nivel energético específico para crecer y sobrevivir, por ello, las reacciones de pardeamiento no enzimáticas, la actividad enzimática, la oxidación de los lípidos y otros aspectos de los alimentos puedan verse influidos por la manipulación de los niveles de actividad del agua. La a_w se suele medir en un rango de 0.03 a 1, cuanto más se acerque el valor de un alimento a 1, más agua estará disponible en ese producto para participar en diversas reacciones químicas y físicas (Babu *et al.*, 2018).

vi. Espesor del producto

La velocidad y tiempo del secado del producto depende del espesor de este. El menor espesor del producto ofrece una mejor retención del color, el sabor, los nutrientes y los componentes funcionales que las muestras de mayor espesor, por lo tanto, el contenido final de humedad y actividad de agua en la muestra serán bajos, aumentando así la vida útil del producto (Kumar *et al.* 2021).

1.3.3 Secado por charolas

El secado por charolas está formado por un gabinete donde se coloca el material a secar en charolas haciendo circular aire caliente, como se aprecia en la Figura 1.5. El aire fluye alrededor de la superficie del producto a velocidad relativamente alta para incrementar la eficiencia de la transmisión de calor y masa (Singh y Heldman, 2001). La condición del secado se controla y monitorea por la temperatura de la cámara al secar materiales a medida que el proceso avanza (Foust *et al.*, 2006).

Singh propone la incorporación de vacío en la cámara de secado (ver Figura 1.6), este vacío logra estabilizar lo más bajo posible la presión de vapor alrededor del producto a secar, logrando la reducción de temperatura a la que la humedad del producto se evapora, y obteniendo una mejora de la calidad del producto.

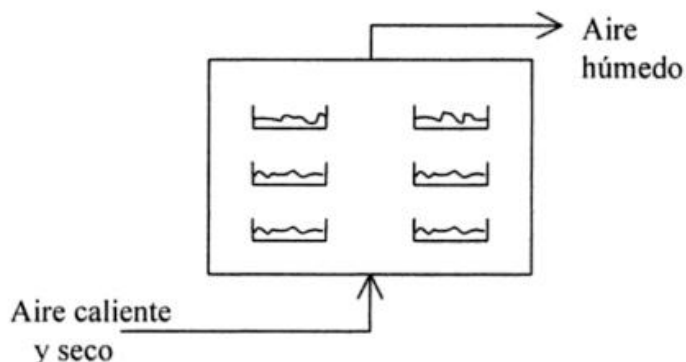


Figura 1.5 Diagrama de secador de charolas (Badui, 2006).

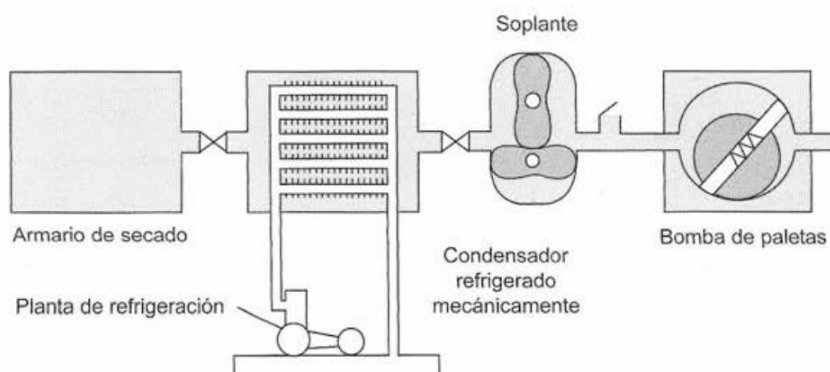


Figura 1.6 Diagrama de secado de bandejas con sistema de vacío (Singh y Heldman, 2001).

Este tipo de secado tiene como ventaja la capacidad de cargar más productos, dado que las bandejas están distribuidas en diferentes niveles, logrando que exista una distribución uniforme del flujo de aire sobre las bandejas, garantizando que el contenido de humedad final de los productos sea uniforme (Misha *et al.*, 2013), aunque para ello, se requiere modificar la trayectoria de circulación del aire o girar las bandejas periódicamente (Jafari y Malekjani, 2023). Por otro lado, es un método que requiere de un largo tiempo de ejecución (aproximadamente 24 h), además de no ser adecuado para producciones a gran escala (Sarpute, 2019).

1.3.4 Secado por ventana de refractancia (VR)

Considerado como uno de los secados de última generación, fue desarrollado por MCD Technologies Inc., es un método relativamente nuevo para secar alimentos sensibles al calor de manera eficiente, que asegura la disminución de la actividad de agua del producto a tratar y disminución eficaz de la actividad microbiana, mientras protege las características organolépticas y nutricionales (Ocoro y Ayala, 2012). Tiene aplicaciones en la industria farmacéutica, nutracéutica, cosmética, en pigmentos y otros bioproductos (Ortiz, 2014).

Como fundamento, se tiene como principal medio de transferencia agua a temperaturas elevadas, siendo la más común a 95°C, además de caracterizarse por la combinación de radiación térmica, conducción y convección de calor. Ochoa-Martínez *et al.* (2012) describe que la radiación resultante traspasa a través de una película con características especiales (Myler) que esta “flotando” sobre la superficie del agua, logrando así que el producto reciba la radiación y provoque la evaporación del agua interna del alimento (descrito como una “ventana”), así como el secado a presión atmosférica, y llevándose a cabo por lotes o continuo (véase Figura 1.7). Vega-Mercado *et. al.* (2001) hace énfasis en que, ante la pérdida de humedad durante el secado, la radiación disminuye, al igual que la “ventana”, que se cierra gradualmente, así mismo, para que el secado por VR sea eficaz, las suspensiones deben tener la consistencia adecuada para facilitar la aplicación y el esparcimiento uniforme en la película de Myler (Nindo y Tang, 2007).

La calidad de las propiedades (por ejemplo, color, contenido de antioxidantes y actividad microbiana) en alimentos termosensibles, puede ser afectada por el secado. En secado por VR, el calor no es aplicado directamente al alimento, por lo que la temperatura alcanzada es inferior a la temperatura del baño (70-85°C), previniendo que el producto se vuelva delicado o pierda sus propiedades (Santos *et al.* 2022).

Algunos parámetros determinantes para la calidad (*v.gr.* el contenido bioactivo y propiedades fisicoquímicas) han sido analizados para conocer la retención de diversos compuestos, como las antocianinas y vitamina C (ácido ascórbico), este último siendo

de relevancia al ser un componente inestable e indicar la degradación de las vitaminas restantes en el alimento al correlacionarse directamente con la calidad del producto seco (Rajoriya *et al.* 2021).

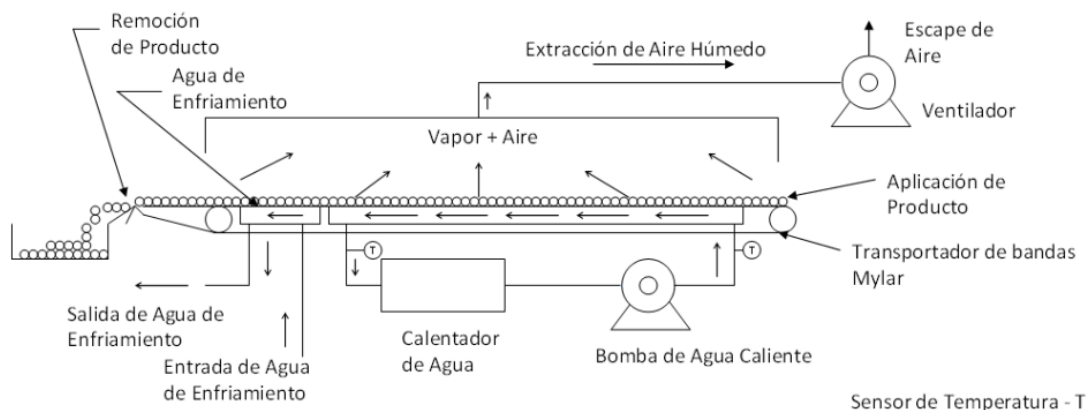


Figura 1.7. Esquema de secador de ventana de refractancia continuo (Ortiz, 2014).

Otras propiedades fisicoquímicas analizadas en el secado por VR han sido la distribución del tamaño y densidad de partículas, porosidad, humedad, morfología del color, contenido total de carotenoides y la sorción de agua, que, comparadas contra las obtenidas en otros tipos de secado, suele observarse mejores resultados en las obtenidas en secado por VR (Zotarelli *et al.*, 2015).

1.3.5 Propiedades fisicoquímicas y físicas de los alimentos

I. Concentración

Heldman y Singh (2006) la define como la cantidad de soluto contenido en una unidad de solvente, puede ser representada en unidades de porcentaje, e indica la medida de peso por unidad de peso, la Ecuación 1.1 indica dicha relación.

$$X_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad (1.1)$$

Donde X_A es la concentración de A, n_A número de moles A y n_B número de moles B.

La concentración algunas veces es expresada por la molaridad, donde A es la cantidad de componente por unidad de masa de algunos componentes como el solvente. Tanto la molaridad y la fracción mol son independientes de la temperatura.

II. Contenido de humedad:

Cantidad de agua presenta en una muestra húmeda. Dos bases son ampliamente usadas para expresar el contenido de humedad, es decir, la húmeda y la seca. Para el primer caso (CH_{bh}), Singh y Heldman (2009) mencionan que es la cantidad de agua por unidad de masa de muestra húmeda (o mojada), como se ve en la Ecuación 1.2.

$$X_{bh} = \frac{g \text{ de agua}}{g \text{ de sólido seco} + g \text{ de agua}} \quad (1.2)$$

Caso contrario, en la Ecuación 1.3 se tiene la relación de base seca (X_{bs}), siendo la cantidad de agua por unidad de masa de sólidos deshidratados (totalmente seco) presentes.

$$X_{bh} = \frac{g \text{ de agua}}{g \text{ de sólido seco}} \quad (1.3)$$

La difusión de agua en fase líquida o gaseosa a través de la estructura del producto puede ocasionar la ebullición del agua en algún punto del alimento. La rapidez de difusión de la humedad puede estimarse mediante las expresiones de difusión molecular (Singh y Heldman, 2009).

III. Actividad de agua

Definido por Badui (2006) como la relación entre la presión del vapor de una sustancia y la del agua pura a una temperatura determinada. En condiciones de equilibrio, la actividad de agua en el alimento es igual a la humedad relativa del aire en contacto con el alimento. El grado de interacción del agua con el alimento es determinado por el contenido de humedad y la actividad de agua (Singh y Heldman, 2006).

De la misma manera, indicó que previas investigaciones han demostrado este parámetro tiene influencia en pérdida de lisina, pardeamiento no enzimático,

deposición de vitaminas, destrucción de pigmentos, estabilidades de pasta y harinas, además de ser un índice de crecimiento microbiano. De igual manera, este parámetro puede demostrar la estabilidad de un alimento a través de la vida de anaquel del producto, donde el rango de actividad de agua adecuado va de 0.3 a 0.6 en alimentos como frutas, hortalizas, carne y enlatados, dado que, microorganismos como bacterias, levaduras y hongos, pueden crecer en alimentos con actividad de agua mayores a 0.80.

IV. Color

El color en la industria alimentaria es un parámetro de calidad. La percepción del consumidor puede verse afectada por la apariencia, y puede causar ideas erróneas respecto al sabor y aroma. Manresa y Vicente (2007) definen el color como la valoración de la energía radiante respecto a una adecuación visual. Un color puede ser descrito de acuerdo con su longitud de onda (λ).

El análisis de color y de los pigmentos involucrados en los alimentos, pueden valorarse mediante técnicas como extracción de la solubilización en disolventes polares o no polares, *a posteriori*, realizar la identificación con un barrido espectral y analizar las longitudes de onda en las que tienen una absorbancia máxima, *v. gr.*, en el caso de los carotenoides, es posible su identificación alrededor de 440 nm (Badui, 2006).

1.3.6 Propiedades térmicas de los alimentos

La estabilidad y conservación de los alimentos se ve influenciada de propiedades térmicas como calor específico o conductividad térmica, además de respaldar a la estimación de tiempos del proceso.

I. Calor específico:

Es la cantidad de calor ganada o pérdida por unidad de masa de producto que es necesaria para cambiar un grado de temperatura a presión constante; véase ecuación 1.4.

$$C_p = \left. \frac{Q}{m(\Delta T)} \right|_{P \text{ const}} \quad (1.4)$$

Donde Q es el calor ganado o perdido (kJ), m es masa (kg), ΔT es el cambio de temperatura del material ($^{\circ}\text{C}$) y C_p es el calor específico (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$).

El calor específico en el análisis térmico es de relevancia al ser función de los componentes que integran en el alimento, como a_w , temperatura o presión, y del equipamiento usado en el calentamiento de estos. Utilizando generalmente es a presión constante, a menos que el proceso requiera presiones altas. El calor específico aumenta al incrementar el contenido en humedad del producto.

El agua al ser uno de los compuestos principales en los alimentos, está considerada en la modelación matemática para predecir el calor específico. Un ejemplo de estos modelos es citado por Singh y Heldman (2006), mostrado en la Ecuación 1.5:

$$C_p = 0.837 + 3.3349 X_w \quad (1.5)$$

Donde X_w es el contenido de agua en fracción. Sin embargo, este modelo no considera otros factores como la temperatura o componentes presentes, considerando esto, se tiene la Ecuación 1.6:

$$C_p = 2.093X_f + 1.256X_s + 4.187X_w \quad (1.6)$$

Donde X representa la fracción másica, el subíndice f indica grasa, s otros sólidos y w agua. La Ecuación 1.7, muestra un modelo que también se basa en la presencia de diversos componentes en un producto alimentario:

$$C_p = 1.424X_c + 1.549X_p + 1.675X_f + 0.837X_a + 4.187X_w \quad (1.7)$$

Donde X es la fracción másica, y los subíndices indican: c , carbohidratos; p , proteínas; f , grasa; a , cenizas; y w , agua. Por otra parte, en la Ecuación 1.8 presenta un modelo que considera los demás factores, junto con el efecto de la temperatura. Su modelo consiste en:

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{pi} X_i \quad (1.8)$$

Donde X_i es la fracción del componente i-ésimo, n en el número total de componentes, y C_{pi} es el calor específico del componente i-ésimo.

II. Conductividad térmica

Singh y Heldman (2006) definen la propiedad térmica que involucra la tasa de transferencia de calor, cantidad de calor conducida por unidad de tiempo a través de un espesor de material mediante una diferencia de temperaturas. Por otra parte, el coeficiente de transferencia de masa por convección k_m se define como la tasa de transferencia de masa por unidad de superficie por gradiente de concentración, esto es indicado en la Ecuación 1.9:

$$k_m = \frac{\dot{m}_B}{A(C_{B1} - C_{B2})} \quad (1.9)$$

Donde $\dot{m}_B$ es el flujo de masa (kg/s); c concentración del componente B (kg/m³); A es la superficie (m²).

Muchos de los alimentos reportados con niveles altos de humedad, suelen tener valores de conductividad térmica cerca al valor del agua (0.597 W/m °C a 20°C). Por otra parte, la conductividad térmica en alimentos porosos o secos es influenciada por la presencia de aire con un valor bajo. Para frutas y vegetales con porcentajes de agua superiores a 60%, la Ecuación 1.10 se ajusta para el cálculo de conductividad.

$$k = 0.148 + 0.493X_w \quad (1.10)$$

Donde k es la conductividad térmica (W/[m °C]), y X_w es contenido de agua expresado en fracción. Otra ecuación empírica que se caracteriza por ser ajustable a un conjunto de 430 datos para alimentos, se presenta en la Ecuación 1.11:

$$k = 0.25X_h + 0.155X_p + 0.16X_f + 0.135X_a + 0.58X_w \quad (1.11)$$

Donde X es la fracción masa, y los subíndices indican: h, carbohidratos; p, proteínas; f, grasa; a, cenizas; y w, agua. Debe mencionarse que los coeficientes en esta ecuación son valores de conductividad térmica para componentes puros.

III. Difusividad térmica

Los mecanismos de transferencia son clasificados a partir de la presión de difusión, difusión térmica, difusión forzada y difusión ordinaria. A menudo, una tasa de movimiento de humedad es descrita por un valor de difusividad térmica, sin importar el mecanismo (Singh y Heldman, 2006). La relación entre conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (C_p), da como resultado la Ecuación 1.12:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1.12)$$

La difusividad térmica puede ser calculada por la sustitución de valores mencionados anteriormente. Choi y Okos (1986) proporcionaron la Ecuación 1.13, considerada de predicción y obtenida por la sustitución de valores de k , ρ y C_p :

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i \quad (1.13)$$

Donde n es el número de componentes, α_i es difusividad térmica de i componentes, y X_i es la fracción masa de cada componente. Otra manera de calcular la difusividad térmica puede ser a partir de la ley de Fick, con la Ecuación 1.14:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = H = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi D_{eff} t}{4l^2} \right] \quad (1.14)$$

Donde D_{eff} es difusividad térmica, H es un número adimensional para representar el contenido de humedad del sólido, X es el contenido de humedad, el subíndice 0 indica en fase inicial en base seca, e es equilibrio en base seca; t es el tiempo y l el espesor del material. (Castro *et al.*, 2021). La aplicación de esta ecuación involucra asumir que la transferencia de masa es unidimensional, el alimento tiene un contenido de humedad inicial uniforme, y el movimiento interno es la principal resistencia a la transferencia de humedad (Singh y Heldman, 2006).

Se ve implicado el término de difusividad efectiva (D_{ef}), la cual, Fogler (2008) menciona que describe un promedio de difusión que puede tener un lugar en cualquier

posición r en el interior de la partícula. Este parámetro puede explicar sucesos que ocurren durante la difusión, como la tortuosidad en las trayectorias, es decir, la presencia de curvas u ondulaciones, demostrando que no toda el área respecto de la densidad de flujo estará disponible. La difusión resulta en un fenómeno complejo debido a los efectos que están implicados en la microestructura de los alimentos al producirse el fenómeno, como la contracción y pérdida de componentes en la estructura celular (Wang *et al.*, 2020).

Los modelos de secado muestran la relación de la difusión de humedad del alimento y la relación con las variables a medida que el secado en el periodo de tiempo, de esta manera, asegura que un secado adecuado contribuya eficientemente en la reducción de energía (Oyinloye y Yoon, 2020).

1.3.7 Modelación matemática en el proceso del secado

El modelado matemático en un proceso puede definirse como el conjunto de ecuaciones matemáticas, variables (magnitudes químicas y/o físicas) y constantes (parámetros) que describen el comportamiento del proceso. Conocer la conducta del proceso permite su interpretación a través de diversos indicadores operacionales en áreas de producción, calidad, medio ambiental, seguridad tecnológica y económica (Mamade *et al.*, 2017). La solución de un modelo matemático requiere de comprobar el ajuste de los parámetros desconocidos en el modelo y posteriormente validarlo dentro y fuera de la región del experimento, todo para verificar que las predicciones sean lo más exactas posibles (Cortés *et al.*, 2020).

Los modelos matemáticos son útiles para optimizar las condiciones de secado y estudiar los procesos de transferencia. Diversas investigaciones basadas en modelos teóricos han demostrado la influencia de determinadas variables de operación (*v.gr.* humedad y temperatura aplicada) sobre el desempeño del proceso del secado, como se observa en la Tabla 1.3, con la comparación de trabajos que utilizaron modelos matemáticos en diferentes técnicas de secado.

Tabla 1.3 Trabajos de modelación matemática.

Modelo empleado	Condiciones y evaluación	Resultados	Referencia
Newton, Page, Page modificado, Henderson and Phabis, Logarítmico, Wang and Singh, Weibull.	Secado solar con convección y forzada con un horno eléctrico (a 55 y 65°C) en soya, donde se evaluó datos de cinética de secado y contenido de humedad.	Humedad final de 7.36 y 7.98% Los modelos de Page, Page modificado y Weibull mostraron mejores ajustes con los resultados experimentales.	Modelado matemático del proceso de soya con tecnologías solares en climas cálidos húmedos (Acosta-Pech y Castillo-Téllez, 2022)
Newton, Page, Page modificado, Henderson and Phabis, Logaritmico, Dos términos, Wang and Singh y Weibull.	Secador tipo gabinete con y sin convección forzada, secado a cielo abierto y tecnologías de secado solar indirecto, evaluándose condiciones de operación y protección contra los efectos de temperatura, uso de DSD para obtener los mejores ajustes.	El mejor ajuste para DSD con convección natural se logró con Weibull, Page y Page modificado. Para forzado, Dos términos, Weibull y logarítmico obtuvieron los mejores resultados.	Modelado matemático del secado de hojas de orégano (<i>Plectranthus amboinicus</i>) utilizando tecnologías directas e indirectas (Castillo Téllez <i>et al.</i> , 2020)
Page, Page modificado, Logarítmico, Lewis, Henderson, Dos términos exponenciales, Fernando y Amarasinghe, Midilli y Wang and Singh.	Secado de piel de mando en sol, secado convectivo, liofilizado y microondas, donde se evaluaron las cinéticas de secado en las cuales se analizaron RMSE, R ² y SSE de cada modelo.	El modelo de Midilli destacó por obtener los mejores ajustes en secado en sol, convectivo, liofilizador y microondas (con R ² de 0.99947, 0.99956, 0.99877 y 0.99999, respectivamente).	Drying kinetics, Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Analysis and Sensory Evaluation of sun, hot-air, microwave and freeze dried mango leather (Sarkar <i>et al.</i> , 2021)
Lewis, Henderson and Phabis, Wang and Singh, Peleg, Page y Logarítmico.	Secado convectivo de aire en hojas de moringa a temperaturas de 40, 50, 60 y 70°C, evaluándose cinéticas de secado.	El modelo de Wang and Singh fue el que mostró mejor coeficiente de R ² .	Mathematical models to describe the drying process of <i>Moringa oleífera</i> leaves in convective air dryer (Ramarao <i>et al.</i> , 2021)

Ortiz (2014), complementa las ecuaciones de variación de masa en estado estacionario y si bien, los modelos obtenidos no son específicos, deben cumplir con la predicción del fenómeno de condensación o transporte de humedad, de acuerdo con la conducción del proceso. Gracias a la aplicación de modelos, se reducen los errores experimentales y se mejora el desempeño del secado, al mismo tiempo, se alcanza la reducción del consumo de energía y aumentan los márgenes de beneficio (Sahoo et al. 2022). Algunos ejemplos de modelos matemáticos empleados en el secado son:

I. Modelos fenomenológicos

Dentro de los más reconocidos, se encuentra el modelo de Luikov, el cual hace uso de ecuaciones de transferencia de calor y masa a nivel macroscópico, basándose del modelo fenomenológico del desequilibrio termodinámico, el cual relaciona factores como la temperatura, humedad y la presión del gas como elementos principales.

II. Modelos basados en la Segunda Ley de Fick

Diversos autores han demostraron el uso de la Segunda Ley de Fick para el análisis de comportamiento del secado para diferentes productos. Esta ley se caracteriza por ser análoga a la ley de conducción de calor de Fourier, la cual establece que tanto el gradiente de concentración como la velocidad de transferencia de masa, son proporcionales, como se aprecia en la Ecuación 1.15:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff}\nabla M) \quad (1.15)$$

Donde D_{eff} es la difusividad efectiva de la humedad, M es la masa y t es tiempo.

III. Modelos experimentales

De acuerdo con diferentes autores, los modelos experimentales son herramientas útiles cuando se simplifica el análisis de la cinética de secado (Villalba-Vidales y Arzola-de la Peña, 2015). En la Tabla 1.4 se encuentran algunos ejemplos de modelos matemáticos experimentales, donde M es la humedad ((kg de agua) / (kg de sólido)), R es la tasa de evaporación (kg/h), a, b y c son constantes, h es el coeficiente de transferencia de calor ((W/m²K), (W/m² °C)) y t es tiempo (s,h).

Tabla 1.4 Modelos matemáticos utilizados en el secado (Villalba-Vidales y Arzola-de la Peña, 2015).

Modelo	
Newton	$MR = e^{-kt}$
Page	$MR = e^{-kt^n}$
Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Logarítmico	$MR = ae^{-kt} + c$
Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
Dos términos exponenciales	$MR = ae^{-k_0t} + (1 - a)e^{-kat}$
Wang and Singh	$MR = 1 + at - bt^2$
Aproximación por difusión	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} - ce^{-ht}$
Modelo de Midilli	$MR = ae^{-kt} + bt$
Wang	$MR = a + bt + ct^2$
Weibull	$MR = \exp(-(t/b)^a)$

1.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier consiste en pasar radiación a través de una muestra, en la cual se determina la fracción de radiación incidente absorbida mediante el análisis de cualquier señal variable en los componentes de frecuencia (Abidi, 2022).

Es una técnica analítica que caracteriza el material a estudiar a través de los procesos de adsorción y emisión sobre las partículas o componentes en la materia, proporcionando información cualitativa en muestras líquidas (soluciones), sólidas (pastas, polvos, películas, fibras) y gaseosas. Se distingue por ser un método rápido, de alta resolución, relativamente sensible, además de tener precisión y exactitud de la longitud de onda.

El espectro usualmente se grafica con las medidas de intensidad de luz infrarroja (absorbancia o % de transmitancia) versus un rango de energía expresado en número de onda (cm^{-1}), usualmente ubicado en el eje de x. Las bandas de absorción de cada grupo funcional característico en el compuesto son representadas por picos, los cuales representan los números de onda donde la luz IR fue absorbida significativamente por la muestra (Khan *et al.*, 2018).

En alimentos, los materiales sólidos pueden ser analizados al mezclarse con analito KBr, debido a la elevada absorbancia de la radiación por la muestra, el KBr actúa como portador de la muestra en el espectro IR, y resulta ópticamente transparente para la luz en el rango IR. Sin embargo, las muestras con KBr son propensas a los efectos de la humedad, observándose en el espectro picos de agua o fluctuaciones en la línea de base debido a la dispersión (Valand *et al.*, 2019).

1.4.1 Mecanismo utilizado en equipos FTIR

En la Figura 1.8 se observan los componentes ópticos de un espectrómetro de un solo haz, donde para obtener la transmitancia o absorbancia de la muestra a tratar se debe obtener un interferograma de referencia mediante barridos de referencia (generalmente, aire) 20 o 30 veces, la acumulación de datos y almacenamiento de resultados en la memoria de la computadora.

Guerrero-Pérez y Patience (2019) mencionan que, en los espectrómetros IR dispersivos, la luz IR policromática incide en un divisor de haz, encargado de fraccionar la luz, donde una mitad se refracta y se dirige hacia un espejo móvil, mientras que la otra mitad se refleja en un ángulo de 90° e impacta contra un espejo fijo. Un espejo giratorio ubicado tras las celdas conduce los dos haces a un interferómetro, produciendo un espectro a partir de la diferencia de intensidades.

Conforme el espejo móvil se mueve, la interferencia de ondas cambiará la intensidad del espectro de cada longitud de onda. Las señales brutas contenidas en el espectro de la luz transmitida en cada posición del espejo y el interferograma, se convertirá al dominio de la frecuencia mediante una transformada de Fourier.

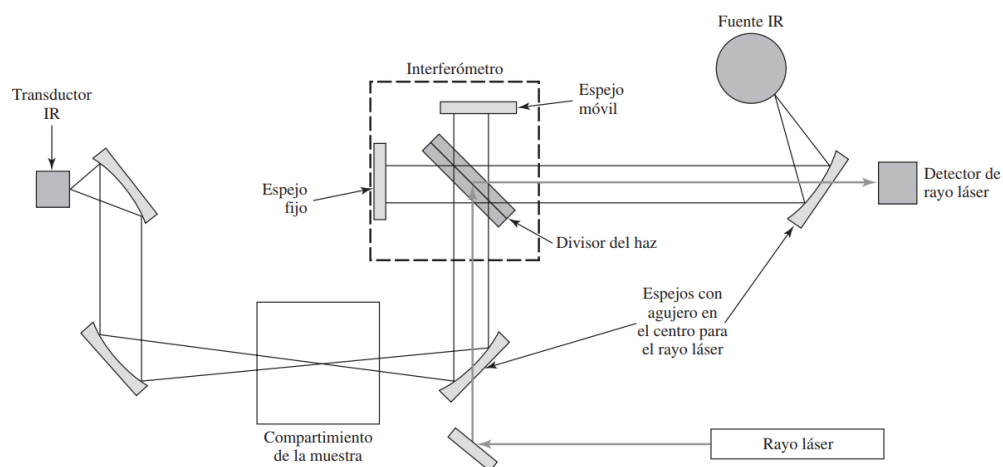


Figura 1.8 Espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier de un solo haz.

En la Figura 1.9, se observa que la región infrarroja se divide en tres regiones: IR lejano ($4000\text{--}13000\text{ cm}^{-1}$), IR medio ($400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$) y IR cercano ($<400\text{ cm}^{-1}$). El IR medio es ampliamente usado en el análisis de muestras, y este mismo es dividido en cuatro regiones:

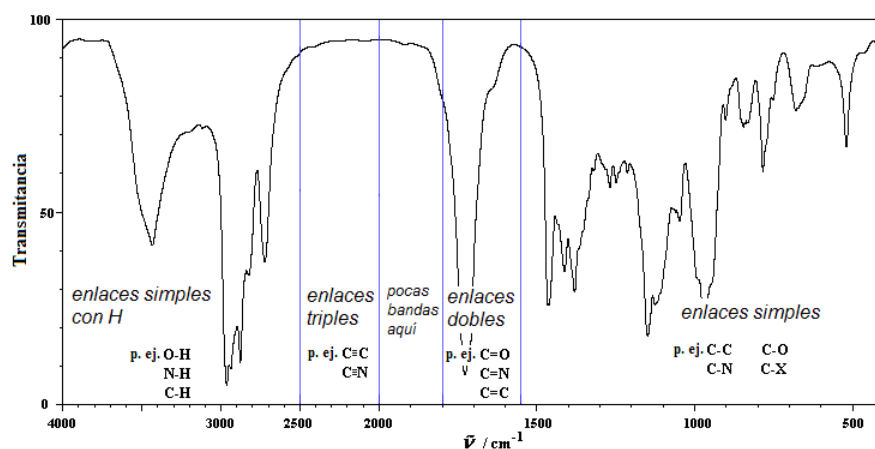


Figura 1.9 Espectro infrarrojo.

- i. Región de enlace simple ($2500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$)
- ii. Región de enlace triple ($2000\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$)
- iii. Región de enlace doble ($1500\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$)
- iv. Región de huella dactilar

1.5 Diseño de experimentos

Los diseños de experimentos son usados para el análisis del efecto conjunto de los factores sobre una respuesta en el trabajo de investigación, además de ser la base de otros diseños de sentido práctico (Montgomery, 2004).

El más importante de estos casos especiales es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles, los cuales pueden ser cuantitativos (*v.gr.* valores de temperatura, presión o tiempo) o cualitativos (*v.gr.* máquinas, operadores, etc.), los niveles “alto” y “bajo” de un factor o por la ausencia de este, y donde, es necesario una réplica completa de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$, conocido como diseño factorial 2^k .

1.5.1 Diseño factorial 2^3

Considerando tres factores (A, B y C) con dos niveles, se forman ocho combinaciones de tratamientos y siete grados de libertad donde, tres grados de libertad se asocian con los efectos principales de A, B y C y los grados restantes se asocian con las interacciones (AB, AC, BC y ABC). Por otro lado, se utiliza la notación “+” y “-” para representar los niveles altos y bajos de los factores.

1.6 Antecedentes

Elías *et al.* (2020), desarrollaron dos modelos matemáticos para la transferencia de calor y masa durante el secado convectivo en manzana, ambos modelos predicen la distribución de temperatura y humedad. El 1^{er} modelo desarrollado considera la difusividad de la humedad en función de la temperatura, mientras que el 2^o modelo considera la difusividad dependiente de la concentración, y concluyeron que la implementación de simulaciones a este tipo de procesos, hacen que la calidad de fruta obtenida sea mejor, además de manejar eficientemente los parámetros involucrados.

Padilla-Gómez y Suárez-Hernández (2021), realizaron la evaluación del contenido de humedad y cambios de color en el chile morrón en dos estados de madurez (verdes y maduros) recubiertos de aceite, empleando el secado VR. Utilizando el modelo difusional de Fick, obtuvieron un buen ajuste de los datos experimentales con valores

de R^2 que oscilaban en 0.993 y 0.9986, además de generar valores de difusividad efectiva de la humedad en chiles verdes entre $4.59 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y $6.93 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, en chiles maduros entre $4.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y $7.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. En la medición de color se hallaron los valores de L^* (claridad) entre 32.4-32.8 para la muestra verde y entre 30.0-32.6 para la muestra madura, con esto concluyeron que el secado VR apoyado con aceite como fluido calefactor, se obtienen altas velocidades de secado, con tiempos cortos.

Leite *et al.* (2022), desarrollaron un modelo matemático y determinaron las propiedades termodinámicas en el secado de semillas de sandía citrón utilizando secado convectivo a 50, 60, 70 y 80°C e intervalos 5, 10, 20, 30 y 60 min., además los coeficientes de difusividad efectiva y propiedades termodinámicas en las semillas. Concluyeron que las semillas de sandía citrón son ricas en lípidos (10% en muestra seca, para 34.20% en muestra deshidratada) y concentración de azúcares (0.17g/100g en muestra seca, 8.87g/100g), además de tiempo de secado corto (aprox. 30 min). Finalmente, la efectividad difusiva incrementa con la temperatura, cumpliendo satisfactoriamente la ecuación de Arrhenius.

Bichi *et al.* (2022), utilizaron Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR) para determinar los grupos funcionales en la corteza de sandía (*Citrullus Lanatus*), además de analizar los componentes químicos en extractos acuosos de la misma usando Cromatografía de Gases (CG-MS). Los autores demostraron la presencia de grupos funcionales como OH, C=O, C-O, H-N, C-N, asociados con fenoles (con frecuencia de ondas de 3814 cm^{-1} a 3946 cm^{-1}), cetonas (2113 a 2530 cm^{-1}), flavonoides (2020 a 2091 cm^{-1}), aldehídos (3828 a 3867 cm^{-1}), amidas (3674 cm^{-1}), alcanos (3905 cm^{-1}), etc. Por otro lado, en el análisis de GC-MS revelaron la presencia de ácidos grasos, esteres metilos y componentes orgánicos volátiles, concluyendo que la presencia de estos compuestos en partes consideradas como desechos es de importancia para concientizar su consumo y preservación.

1.7 Avances

Cisneros *et al.* (2019), determinaron las condiciones de secado por VR para hongos shiitake (*Lentinula edodes*), evaluando el efecto sobre el contenido de β -glucan a través del kit de ensayo Megazyme, con el objetivo de hacer la comparación de este compuesto tanto en el hongo deshidratado, como en el fresco. Obtuvieron que las mejores condiciones de secado fueron a 85°C, además de una actividad de agua ~ 0.55 , y una concentración de β -glucan $\sim 16.33\text{g}/100\text{g}$, demostrando una pérdida de mínima del aporte nutricional.

Santes *et al.* en 2019 analizaron la composición de compuestos fenólicos en rebanadas de la pulpa de sandía con espesores de 1, 3 y 5 mm, natural y tratadas mediante el secado VR a 70, 80 y 90°C, cuantifican el contenido fenólico usando el método Folin-Ciocalteu, y concluyeron a 70°C en las rebanadas de 3 y 5 mm durante 240 min. alcanzan la mayor retención de compuestos fenólicos de 567.8 y 599.9 mg/100g en muestra seca. Estos valores representaron una retención de compuestos fenólicos significativa.

Utilizando secado por VR, González *et al.* (2021), obtuvieron “snacks” de piña (*Ananas comosus*), a través de la combinación de VR y freidora de aire. Los trozos de piña fueron deshidratados a 70, 80 y 90°C, y modelaron la cinética de temperatura mediante distintos modelos matemáticos (Newton, Page, Wang & Singh y Midilli). En cada muestra determinaron color (L^*) y cambio total de color (ΔE), actividad de agua, coeficientes de difusión y energía de activación, y obtuvieron que, a mayor temperatura, mayor será el coeficiente de difusión, y requerirá tiempos de secado menores. Para una humedad del 9 %, y 90, 80 y 70 °C requirieron 90, 110 y 130 min de secado, respectivamente. De los modelos propuestos, el de Midilli ajustó mejor las cinéticas de secado, además de mostrar mayor retención de vitamina C y del color.

Torres-Niño *et al.* (2021), evaluaron el efecto del secado de ventana de refractancia en dos estados (sólido y semisólido) de muestras de betabel en propiedades fisicoquímicas como actividad de agua, humedad y color. Obtuvieron tiempos promedios de 40 minutos en el secado VR, comparándolo contra tiempos de secado

en secador de charolas, tomando un promedio de 240 minutos. Los autores concluyeron que el secado de ventana de refractancia es un método efectivo para preservar alimentos perecederos como el betabel.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2

MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Desarrollo experimental del proyecto

El desarrollo experimental consistió en (1) obtener rodajas uniformes de mesocarpio de sandía y de pulpa de tomate de gap específico, (2) determinar las condiciones del secado por equipo y, (3) los análisis de las muestras por FTIR (4) Modelación matemática de cada proceso, cada etapa es representada en la Figura 2.1.

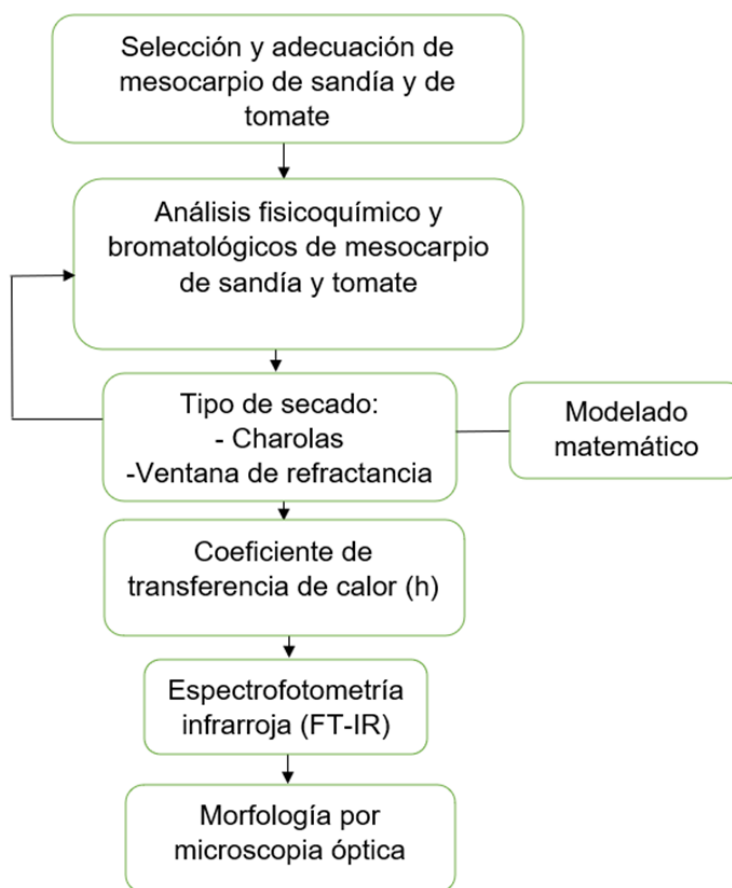


Figura 2.1. Diagrama general de la modelación matemática del secado por VR en sandía y tomate.

2.1.1 Selección de materia prima.

Sandía y tomate fueron adquiridos en el mercado Emiliano Zapata de la Cd. de Orizaba, Ver., y seleccionados conforme a la madurez. Las muestras enteras fueron lavadas con solución acuosa para eliminar cualquier materia extraña o polvo adherido.

2.1.2 Obtención del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.

Para la obtención de mesocarpio de sandía (parte blanca) se retiró pulpa y cáscara (parte verde) y se licuó, como se aprecia en la Figura 2.2 (a). Por otra parte, el tomate se escaldó para remover cáscara y semillas con ayuda de una cuchara, obteniendo pulpa del tomate. En el caso de las rodajas, con ayuda de un vernier, se cortaron rodajas con mesocarpio y tomate con espesor de 3, 5 y 7 mm, y un diámetro de 4 cm, como se aprecia en la Figura 2.2 (b), los cuales fueron medidos por un vernier.



(a)



(b)

Figura 2.2 (a) Pulpa licuada de sandía y mesocarpio de sandía, (b) rodajas de tomate y mesocarpio de sandía.

2.2 Análisis fisicoquímico

2.2.1 Determinación de pH

Consiste en la medición de la actividad del ion H^+ e índices ácidos. Al determinar el pH, se utilizó el potenciómetro Hanna Instruments HI 2211 entre el vidrio y el electrodo

de referencia en la muestra fresca tanto de pulpa de mesocarpio de sandía como en tomate.

2.2.2 Determinación de densidad

Se tomó un matraz aforado de 100 mL, y pesó en la balanza analítica Ohaus Pioneer TM, posteriormente se aforó con el jugo de mesocarpio de sandía y se volvió a pesar, se restó el peso inicial del matraz vacío menos al peso del matraz con el jugo, es decir, la Ecuación 2.1.

$$\text{Densidad de jugo } (\rho) = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde m es peso del jugo (g) y V es volumen del jugo (mL).

2.2.3 Determinación del porcentaje de humedad

La humedad se determinó por el método de peso constante de acuerdo con la NMX-F-083-1986 (Dirección General de Normas, 1986). Primero se secaron las capsulas de metal por 5 h a 100 °C en la mufla Thermo Scientific FB1415M, y se colocaron en un desecador. Después, las capsulas fueron taradas y se le colocaron 10 g de muestra de mesocarpio de sandia o pulpa de tomate, se depositaron en la mufla a 100 °C durante 12 h, dejando reposar 2 h en el desecador y finalmente se pesaron en la balanza analítica Ohaus Pioneer TM. Una vez obtenido el peso final, se calculó el porcentaje de humedad con la Ecuación 2.2:

$$\% \text{ en humedad} = \frac{(p_i - p_f)}{p_i} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde p_i es el peso inicial de la muestra húmeda (g) y p_f el peso final de la muestra seca (g). También se obtuvo la humedad base húmeda con la Ecuación 2.3:

$$\text{humedad base húmeda} = \frac{(p_i - p_f)}{p_i} \quad (2.3)$$

Donde p_i es el peso inicial (g) y p_f el peso final (g).

2.2.4 Determinación de sólidos totales

Bajo la norma mexicana PROY-NOM-211-SSA1-2002 (Secretaría de Salud, 2002), con los datos obtenidos de la determinación de humedad, se calculó los sólidos totales de sandía y tomate con la Ecuación 2.4:

$$\% \text{ de sólidos totales} = 100 - \% \text{ humedad} \quad (2.4)$$

2.2.5 Determinación de actividad de agua (a_w)

La actividad de agua (a_w) se determinó con el medidor de actividad de agua VTSYIQI VTS-160A (véase Figura 2.3), con rango de 0.1 a 1.0 a_w . Se colocó 1 g de muestra en la tapa inferior del medidor, para posteriormente realizarse la medición.



Figura 2.3 Medidor de actividad de agua VTS-160A.

2.2.6 Determinación de color

Los parámetros del análisis de color se realizaron con el colorímetro para sólidos HunterLab modelo MiniScan XE Plus, cuyos resultados fueron capturados con Universal Software versión 4.10, el cual proporciona la diferencia de color (ΔE), mediante la Ecuación 2.5:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (2.5)$$

Donde las diferencias de L , a y b fueron obtenidas de las Ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8 respectivamente:

$$\Delta L = L_{inicial} - L_{final} \quad (2.6)$$

$$\Delta a = a_{inicial} - a_{final} \quad (2.7)$$

$$\Delta b = b_{inicial} - b_{final} \quad (2.8)$$

Donde L representa la luminosidad, a son las coordenadas rojo/verde y b son las coordenadas amarillo/azul.

2.3 Análisis bromatológicos

2.3.1 Determinación de polifenoles

Se utilizó el ensayo de Folin-Ciocalteu, que consiste en la reacción del reactivo con los compuestos fenólicos. Para obtener el extracto de polifenoles de la muestra de tanto mesocarpio de sandía y tomate, se tomó una cantidad de jugo de la muestra y se añadió metanol en relación 1:2 en un tubo, para posteriormente homogenizar el contenido y centrifugar a 10000 rpm durante 15 min a 10°C. Finalmente se retiró el flotante del tubo.

Para la determinación, se tomaron 250 µL de las diferentes disoluciones patrón de ácido gálico de entre 0 y 16 ppm de concentraciones (en intervalos de 200 ppm) y del flotante del extracto de polifenoles de la muestra, colocándose en matraces aforados de 125 mL, en los cuales se adicionó 15 mL de agua destilada y 1.25 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu. Después de homogenizar la mezcla y haber dejado reposar durante 8 min en oscuridad, se adicionó a cada matraz 3.75 mL de disolución de carbonato sódico al 7.5%, para posteriormente llevarlo a un volumen de 25 mL con agua destilada y se volvió a homogenizar y guardar en un espacio oscuro durante 2 h. Finalmente se midió la absorbancia a 765 nm con el equipo Genesys 20 en un rango de 375 a 1100 nm.

2.3.2 Determinación de licopeno

Se empleó el método de Espinoza-Ramírez (2023), que consiste en el uso de 5 mL de etanol acuoso al 95%, 5 mL de 0.05 % (p/v) de butilhidroxitolueno (BHT) (diluido con 10 mg del antioxidante y acetona), 10 mL de acetona y 0.6 mL de muestra, los cuales

se mezclaron y se depositaron en frascos ámbar. La mezcla reposó por 15 min, se agitó y se añadieron 3 mL de agua destilada, agitando nuevamente por 5 min.

Se tomó una alícuota de 3.5 mL de la capa flotante de la mezcla y se depositó en la celda de vidrio para posteriormente examinarlo a 503 nm en el espectrofotómetro Genesys 20, utilizando hexano como blanco. El contenido final de licopeno se obtuvo con la Ecuación 2.9:

$$\frac{mg \text{ de licopeno}}{ml \text{ de jugo}} = \frac{(Abs_{503})(PM)(FD)(10^6)}{(\epsilon)(L)} \quad (2.9)$$

Donde ϵ es el coeficiente de extensión molar del licopeno en hexano (17.2×10^4 M/cm), PM es peso molecular del licopeno (536.9 g/mol), L es el largo de la celda (1 cm) y FD es el factor de dilución.

2.3.3 Determinación de antocianinas

La extracción de antocianinas se realizó empleando un solvente a base de etanol anhidro, agua destilada y ácido clorhídrico en relación 7:3:1 (v:v:v). Se colocó en un frasco ámbar la muestra y el solvente en relación 1:1 (v:v), *a posteriori*, dejar 24 h a 4°C. Finalizado el tiempo de extracción, se filtró con papel filtro de poro No.1 y se concentró a 55°C en una parrilla magnética IKA C-MAG HS 7, hasta obtener el 60% del volumen inicial.

La cuantificación de antocianinas utilizó las siguientes soluciones tampón:

pH 1.0 (cloruro de potasio, 0.025 M), se pesaron 1.86 g KCl y en un vaso de precipitado se colocó 980 mL de agua destilada. El pH se midió y se ajustó a 1.0 (± 0.05) con HCl, para finalmente transferirlo a un matraz volumétrico de 1 L y aforarlo con agua destilada.

pH 4.5 (acetato de sodio 0.4M), se pesaron 54.43 g $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y se depositaron junto con agua destilada (980 mL) en un vaso de precipitado. El pH se midió y se ajustó a 4.5 (± 0.05) con HCl, para finalmente transferirlo a un matraz volumétrico de 1 L y aforarlo con agua destilada.

Obtenido el extracto, se determinó la concentración de antocianinas con 1 mL de extracto y 5 mL de solución buffer pH 1.0; se agregó 1 mL de extracto a 5 mL de solución buffer pH 4.5 y en un espectrofotómetro Genesys 20 se hizo lectura de absorbancia a 520 nm y 700nm a las soluciones, utilizando como blanco agua destilada. La concentración de antocianinas se determinó a partir de la Ecuación 2.10:

$$\text{Concentración de antocianinas} = \frac{(A)(M_w)(FD)(10^3)}{(L)(\varepsilon)} \quad (2.10)$$

Donde, A es la absorbancia, M_w es peso molecular de cianidina-3-glucósido, equivalente a 449.2 g/mol), FD es factor de dilución, ε es el coeficiente de extensión molar (26900), L es longitud de la celda en centímetros. La absorbancia es calculada con la Ecuación 2.11:

$$A = (Abs_{520nm} - Abs_{700nm})pH1 - (Abs_{520nm} - Abs_{700nm})pH4.5 \quad (2.11)$$

2.3.4 Determinación de carotenoides

En un matraz de balón, se colocaron 50 mL tanto de la muestra como de acetona. Se agitó, decantó y agregó más acetona a la mezcla para lograr la extracción, este proceso se repitió hasta obtener la mínima coloración en la mezcla realizada. Logrando lo anterior, en una parrilla magnética se colocaron los pigmentos para concentrar la solución durante 15 min, se pesaron para obtener el valor del peso de los pigmentos totales y se agregaron 15 mL de hexano y 0.1 g de Na_2SO_4 anhidro.

Se dejó reposar en el desecador durante 15 min agitando cada 3 min y se traspasó cuantitativamente la solución que contenía el hexano a un matraz aforado de 100 mL, el cual se completó con hexano.

Se tomaron aproximadamente 2 mL de la solución con ayuda de una pipeta y se depositaron en un tubo de ensayo, se agregaron 8 mL de hexano y con el espectrofotómetro Genesys 20, se midió la absorbancia a 490 nm, utilizando hexano como blanco. Finalmente, la solución con hexano se concentró y volvió a pesar para obtener la cantidad de carotenoides totales con la Ecuación 2.12:

$$\frac{mg \text{ de carotenos}}{ml \text{ de jugo}} = \frac{(A)_{490}(V)(1000)}{(\epsilon)(100)(ml \text{ de la muestra})} \quad (2.12)$$

Donde V es volumen (mL), A_{490} es la absorbancia de la muestra y ϵ es el coeficiente de extensión molar en hexano.

2.4 Condiciones del secado por charolas y ventana de refractancia (VR)

Utilizando un baño térmico de acero inoxidable Thermo Electron Neslab EX 17 Digital One con capacidad de 18.1 L con temperatura máxima de 120 °C, se colocó en la superficie una membrana de poliéster (Mylar), como se muestra en la Figura 2.4, y en donde se depositaron las muestras de mesocarpio de sandía y tomate.



Figura 2.4 Baño térmico.

En este proyecto se realizó la modificación al equipo que consistió en añadir una cabina de metacrilato, colateralmente equipada con en las paredes 2 extractores de aire Steren de forma proporcional. La cabina es sujeta con pijas y caucho (Figura 2.5).

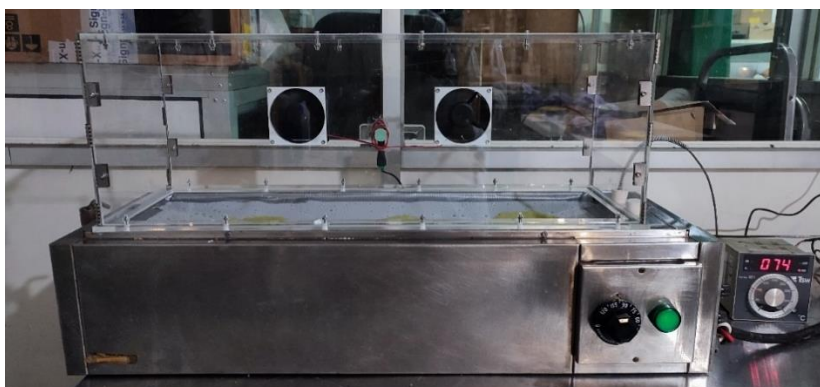


Figura 2.5 Equipo de ventana de refractancia modificado.

En tanto que, el secado por charolas, se utilizó el secador Hamilton Beach 32100 (con rango de 50 a 70°C), mostrado en la Figura 2.6, donde se colocaron las muestras, estas se deshidrataron a temperaturas de 50, 60 y 70°C 3 a 15 h.



Figura 2.6 Secador de bandejas Hamilton Beach 32100.

2.5 Modelación matemática

2.5.1 Cálculo de variables

Con los datos obtenidos del secado por ventana de refractancia y el secado por charolas, se calcularon de manera teórica las variables térmicas como capacidad calorífica (Ec. 1.6) y conductividad térmica (Ec. 1.10).

2.5.2 Cálculo de difusividad efectiva

A partir del modelo de la Segunda Ley de Fick, se calculó la difusividad efectiva en el proceso. Para ello, se requiere la humedad relativa, representada por la Ecuación 2.15:

$$MR = \left(\frac{M_t - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \right) \quad 2.15$$

Donde M_t es el contenido de agua en el tiempo t (g producto húmedo/g agua), M_{eq} es el contenido de agua en equilibrio (g producto húmedo/g agua) y M_o es la humedad inicial (g producto húmedo/g agua). El valor de M_{eq} puede eliminarse de la ecuación al

ser un valor muy pequeño en comparación al dominio de humedad, por ello, se simplifica la Ecuación 2.15 y se tiene la Ecuación 2.16:

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2.16)$$

Posteriormente, se realizó una regresión lineal de primer orden con las gráficas de humedad obtenidas, además de obtenerse la ecuación de la recta mediante Excel. La difusividad efectiva se calculó mediante la Ecuación 2.17:

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[\frac{E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \quad (2.17)$$

Donde D_0 representa el factor pre exponencial (m^2/s), E_a es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante de los gases ($J/mol \cdot K$) y T_A la temperatura del aire (K).

2.5.3 Modelación de secado de charolas

Se propuso el uso de los modelos de Lewis, Page y Weibull, mencionados en la Tabla 1.3, los cuales estudian el comportamiento de las cinéticas de secado en base a los mecanismos de transferencia de masa difusional, y los cuales consideran la relación de humedad (MR) con la función del tiempo de secado, expresado en la Ecuación 2.16. Por otro lado, el análisis estadístico para la selección del modelo más conveniente fue mediante el cálculo del coeficiente de determinación, mostrado en la Ecuación 2.18, el cual fue analizado mediante Excel con las variables involucradas en los modelos.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i}) \sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i})^2 \right]}} \quad (2.18)$$

Otros coeficientes utilizados fueron ji-cuadrada (χ^2), la cual es calculada con la Ecuación 2.19; y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), en la Ecuación 2.20, este último aporta la desviación entre los datos experimentales y pronosticados, indicado por los valores más cercanos a cero.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N ((MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2)}{N - n} \quad (2.19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (2.20)$$

Donde $MR_{pre,i}$ denota la relación de humedad experimental, $MR_{pre,i}$ es la relación de humedad predicha por el modelo matemático, N es el número de observaciones, y n es el número de constantes.

2.6 Espectroscopía FTIR

Se hizo uso del equipo FT-IR Nicolet iS5, mostrado en la Figura 2.7, y el software de thermo Scientific OMNIC en las muestras secas de mesocarpio de sandía y tomate, las cuales fueron previamente acondicionadas con 0.05 g KBr para ello, se limpió el cristal donde se colocó la muestra con alcohol y el excedente con papel tissue, para después hacer una lectura de prueba.

En el caso de muestras sólidas, se colocó una pequeña cantidad de la muestra junto al cristal con la ayuda de una espátula de goma, con cuidado de no rayar el cristal. Con el pistón, se ejerció la suficiente presión para obtener las lecturas.

Para el análisis de las lecturas, se utilizó el software OMNIC para obtener los valores de los picos, además de ajustarse el umbral de intensidad %R para su posterior selección.



Figura 2.7 FT-IR Nicolet iS5.

2.7 Diseño experimental: diseño factorial 2³

Siendo el diseño más simple del sistema 2^k, tiene como característica tener 2 factores, cada uno con tres niveles. Se consideraron como factores los tipos de secado, espesores de las muestras de mesocarpio de sandía y tomate (3, 5 y 7 mm) y las temperaturas utilizadas durante el secado por ventana de refractancia (65, 75 y 85°C) y de charolas (50, 60 y 70°C), como se aprecia en la Tabla 2.1, y donde la variable de respuesta fue la humedad, actividad de agua (a_w), difusividad efectiva, energía de activación, capacidad calorífica. Se hizo uso de Minitab Statistical Software 2020 para elaborar el diseño factorial.

Tabla 2.1 Diseño factorial del secado de ventana de refractancia y charolas.

	Secado					
	VR			CH		
Temperatura (°C)	85	75	65	70	60	50
Espesor (mm)	3	5	7	3	5	7

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinaciones fisicoquímicas.

Las determinaciones fisicoquímicas se llevaron a cabo conforme a la metodología, tanto en muestras naturales (frescas), como en deshidratadas. En la Tabla 3.1, se muestran los resultados del análisis en mesocarpio de sandía y tomate natural:

Tabla 3.1. Resultados del análisis fisicoquímico en mesocarpio de sandía y tomate frescos.

	Unidades	Mesocarpio de sandía	Tomate
Densidad	g/mL	0.7789	0.9944
pH	-	5.56	4.4
Actividad de agua	-	0.92	0.94
Humedad	%	95.65	94.38
Sólidos totales	%	7.35	4.77

En mesocarpio de sandía se obtuvo un 95.65% de humedad, siendo similar al reportado por Valle-Vargas *et al.* (2020), donde obtuvieron 95.05%, aunque distando de Nasir *et al.* (2020) que reportaron 85.27%, posiblemente por la variedad utilizada o por las condiciones en las que se realizaron las pruebas. El contenido de agua influye en otros parámetros importante para la estabilidad del alimento, como el pH, donde se obtuvo 5.56, valor cercano a los reportados por los autores anteriores (5.17-5.56), o como actividad de agua, donde se obtuvo 0.92, distando de Nasir con a_w de 0.671, esta diferencia puede deberse a alguna fluctuación en la temperatura mientras se realizaba la prueba, dado que este factor puede ocasionar modificaciones en la actividad de agua (Badui,2006).

Otros factores que pudieron influenciar en las diferencias de los resultados pueden deberse a factores como las condiciones de cosecha del fruto, la madurez o la variedad estudiada.

3.1.1 Humedad en tomate y sandía

El porcentaje de humedad obtenido en tomate fue de 94.38%, comparando con Torres (2012) y Gyimah *et al.* (2020), los cuales indicaron valores de humedad de 87.72-96.53%, en pH se indicó 4.4, cercano a los autores Hossain *et al.* (2021), Starek *et al.* (2019), Huanativo-Suarez *et al.* (2021), y Torres (2012), con rango de 3.5 a 5.2, e indicando la acidez característica de este fruto, la diferencia entre estos puede deberse a la variedad. Para sólidos totales, los mismos autores determinaron porcentajes de 3.5-5, parecido al reportado en este trabajo, con 4.77, por otro lado, Jahanbakhsi *et al.* (2019), comprobaron la densidad del tomate, donde obtuvieron un valor promedio de 0.47 g/cm³.

Para las muestras deshidratadas, los resultados se pueden observar en el Apéndice A, donde, se observaron rangos de humedad en mesocarpio de 0.0308 hasta 0.053 g agua/g producto húmedo en los diferentes secados, y en tomate 0.0361 hasta 0.0693 g agua/g producto húmedo, evidenciando la reducción del contenido de humedad. En la Figura 3.1 (a), se observan las humedad final alcanzada en muestras de cada tipo de secado aplicado, donde los resultados en SVR con y sin cabina al tener humedades inferiores a 0.04 g agua/g producto húmedo, no obstante, el uso de la cabina discierne en el parámetro de actividad de agua, puesto que, en secado por charolas y ventana de refractancia sin cabina se obtuvieron a_w iguales o mayores a 0.4, como se observa en la Figura 3.1 (b), contrario a, con cabina, donde las muestras deshidratadas alcanzaron valores de 0.31 a 0.37, demostrando la efectividad de esta implementación.

Para tomate, en la Figura 3.2 (a) se aprecia que se obtuvieron humedades intermedias en secado por charolas y ventana de refractancia sin cabina con las temperaturas planteadas, sin embargo, al igual que en mesocarpio, la aplicación de el secado por ventana de refractancia con cabina tiene influencia para la disminución de actividad de agua en los tratamientos a mayores temperaturas, como se observa en la Figura 3.2 (b), esta diferencia puede radicar en los tiempos de secado, y así mismo, a los costos de producción y disminución de energía utilizada en el proceso. Por otra parte, el ANOVA para actividad de agua y humedad

tanto para mesocarpio de sandía, como en tomate indicaron valores de p inferiores a <0.05 , es decir, es significativo.

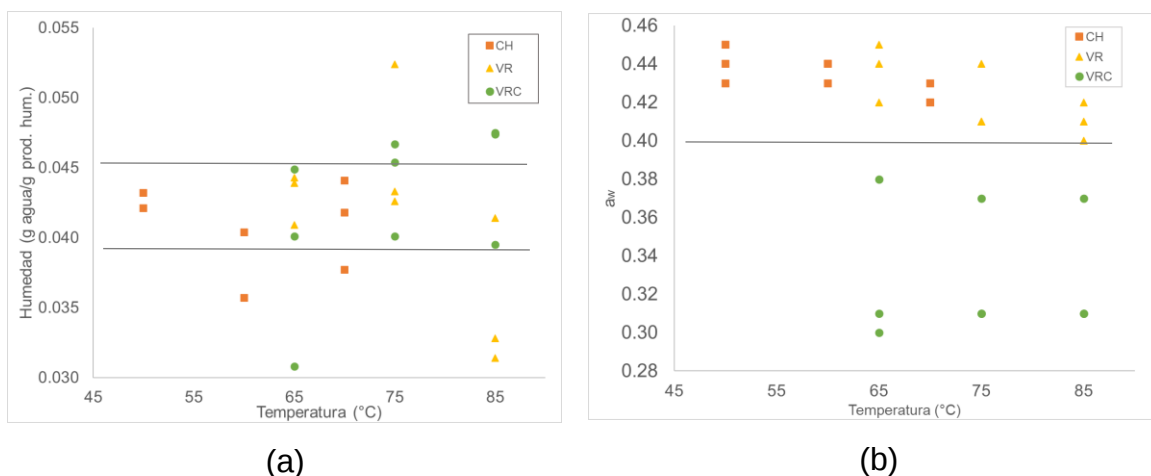


Figura 3.1 Gráfica de humedad vs temperatura (a) y gráfica de a_w vs temperatura en mesocarpio de sandía (b).

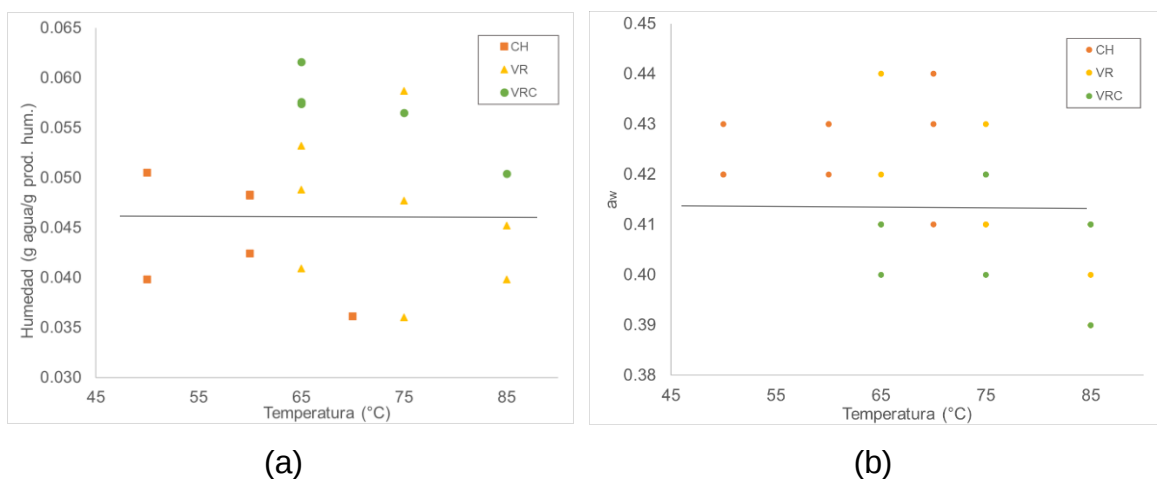


Figura 3.2 Gráfica de humedad vs temperatura (a) y gráfica de a_w vs temperatura en tomate (b).

3.1.2 Colorimetría en mesocarpio de sandía y tomate.

La colorimetría es una determinación que demuestra el efecto físico del secado en los productos, es decir, esta puede cuantificar el oscurecimiento ocurrido en las muestras de mesocarpio de sandía y tomate. A temperaturas altas, se incrementa el valor de luminosidad como se reporta en la Tabla 3.2 con 75 y 85°C, siendo el

mayor a esta última, coincidiendo con Nasir *et al.* (2020) reportaron valores de 57.57 ± 0.03 en mesocarpio de sandía, donde, la posible diferencia entre la luminosidad en las muestras deshidratadas puede deberse a las condiciones de secado (temperatura), estado de la pulpa (oxidación) o incluso variedad. Las coordenadas *a* representan colores rojo y verde, como se aprecia en la Figura 3.3, dado que en el secado por ventana se obtuvieron rangos de -0.82 a 1.79, indican que las muestras presentan un color ligeramente marrón, en coordenadas *b* positivas indican color amarillo en la muestra, dado que los rangos obtenidos fueron de 11.42 a 6.57, pueden indicar que el alimento tiene ligeros cambios en el color, sin lograr cambios bruscos o que indiquen rastros de haberse tostado, en comparación de valores reportados de 3.04 ± 0.02 y 29.24 ± 0.02 en *a* y *b*, respectivamente.

Tabla 3.2 Colorimetría en mesocarpio de sandía deshidratado por secado VR.

	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE	<i>C</i> [*]	<i>h</i> [°]
Muestra fresca	39.23	-0.86	6.17	-	-	-
85°C	57.76	-0.82	12.89	49.70	6.10	-0.074
75°C	44.38	0.54	11.42	37.18	10.95	-0.216
65°C	24.46	1.79	6.57	16.55	3.39	-3.68

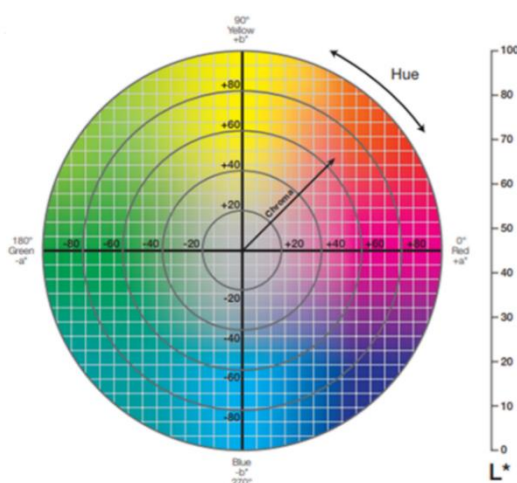


Figura 3.3 Coordenadas de colorimetría (X-Rite, 2023)

En secado de charolas, se puede observar en la Tabla 3.3 que el parámetro de luminosidad aumentó en los tratamientos a 70 y 60°C y disminuyó con 50°C, esto posiblemente al oscurecimiento que obtuvo después del secado. Por otro lado, los valores en las coordenadas *a* y *b* tuvieron incrementos en cada tratamiento, indicando en el caso de *a* que el mesocarpio cambia su característica tonalidad verde al tonarse color amarillo, siendo reafirmado al incrementar el parámetro *b*, donde, el tratamiento a 60°C fue el que obtuvo mayor diferencia de color (ΔE).

Tabla 3.3 Colorimetría en mesocarpio de sandía deshidratado por secado de charolas.

	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE	<i>C</i> [*]	<i>h</i> [°]
Muestra fresca	36.30	-1.10	6.37	-	-	-
70°C	41.65	0.95	12.18	11.53	9.58	-2.99
60°C	38.29	2.98	13.03	13.76	12.70	-4.87
50°C	32.57	1.79	10.23	10.05	8.30	-3.88

En tomate, se muestra en la Tabla 3.4 que las muestras en secado por ventana de refractancia se obtuvieron mayores valores de *L*, *a* y *b* en las muestras deshidratadas a 75°C, donde se obtuvieron 20.93, 9.79 y 7.38, respectivamente. La tendencia de las coordenadas *a* indicaron que el secado conserva el color rojo original del tomate, tornándose ligeramente más oscuro con la disminución de temperatura, es decir, intensificó el color en las muestras.

Tabla 3.4 Colorimetría en tomate deshidratado por secado VR.

	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE	<i>C</i> [*]	<i>h</i> [°]
Muestra fresca	15.01	7.83	6.14	-	-	-
85°C	19.80	8.02	6.89	7.29	-0.81	0.16
75°C	20.93	9.79	7.38	6.60	1.03	0.34
65°C	10.70	6.81	2.45	10.26	4.35	0.74

Los valores obtenidos por Tahmasebi y Emam-Djomeh (2021), en tomate fresco valores de L , a y b de 16.44 ± 0.30^a , 5.94 ± 0.03^e , 2.62 ± 0.02^e , respectivamente, y en diversos tipos de secado (v.gr. al vacío, solar, convectivo) obtuvieron valores de L de 16.16 ± 0.27^a a 12.76 ± 0.34^f . Por otro lado, se difiere con Engín y Kuscu (2023), los cuales, reportan $48.87^d \pm 3.06$, $20.12^d \pm 1.76$ y $16.18^d \pm 1.17$ para L , a y b en tomate fresco, y con rangos de $50.15^e \pm 1.77$ a $31.50^a \pm 0.1$, $20.73^d \pm 1.32$ a $13.23^a \pm 0.34$, $17.01^d \pm 0.01$ a $7.60^a \pm 0.36$, en muestras deshidratadas por secado convectivo. Las diferencias marcadas en estos tipos de secado indican la ventaja del uso de secado por ventana de refractancia al preservar el color después del tratamiento térmico. En la Tabla 3.5, se muestran los resultados en secado de charolas, donde, en comparación a los obtenidos en ventana de refractancia, parámetros como luminosidad, a y b son fueron menores, además de mostrar parámetros de chroma y hue mayores, demostrando que el uso del secado VR intensifica el color en el alimento.

Tabla 3.5 Colorimetría en tomate deshidratado en secado de charolas.

	L	a	b	ΔE	C^*	h°
Muestra fresca	17.31	9.97	4.75	-	-	-
70°C	16.05	5.34	3.86	7.20	-6.49	2.55
60°C	14.55	7.14	4.74	5.45	-2.26	3.00
50°C	14.28	4.70	2.52	9.86	-8.86	0.07

3.1.3 Bromatología en mesocarpio de sandía y tomate.

Los estudios bromatológicos señalan cuantitativamente la composición química de los alimentos, en este caso, para los frutos estudiados, los resultados se resumen en la Tabla 3.6, donde, se comprobó que en sandía se tiene 5.01 mg/kg de carotenoides, mientras que en tomate 5.14 mg/kg. Otro compuesto presente en ambos frutos es licopeno, con 34.32 mg/kg y 29.39 mg/kg, respectivamente. Estos resultados coinciden con Ilahy *et al.* (2019), donde mencionan rangos de licopeno y carotenos de 10-150 y 3-12.5 mg/kg en peso húmedo de tomate rojo, por el contrario, en sandía el contenido del licopeno varía de acuerdo con la especie,

teniendo promedios de 30 a 70 mg/kg en peso húmedo, y de carotenos de 1.2 a 10.3 mg/kg peso húmedo.

El contenido de polifenoles y antocianinas difieren con Torres (2012) en tomate, al obtener 1.39 mg ácido gálico EAG/g y 0.29 mg cianidina 3-glucósido/g respectivamente, posiblemente por el estado de madurez del fruto. Por otro lado, en mesocarpio de sandía, Kistriyani *et al.* (2019) en antocianinas reportaron 0.0334 y 0.0668 mg ácido gálico EAG/g en sandía roja y sandía amarilla, indicando la diferencia entre especies.

Tabla 3.6 Resultados de análisis bromatológicos de sandía y tomate.

	Unidades	Mesocarpio de sandía	Tomate
Carotenoides	mg/kg	5.01	5.14
Licopeno	mg/kg	34.32	29.392
Polifenoles	mg ácido gálico EAG/g	0.02777	0.02775
Antocianinas	mg cianidina 3-glucósido/g	0.0887	0.6211

3.2 Determinación de coeficientes y modelado matemático

Buscando alternativas para el mejorar la efectividad del secado por ventana de refractancia, se propuso el uso de una cabina de metacrilato con ventiladores Steren 4" (12 V) en el baño térmico, como se observa en la Figura 3.4 (a) y (b) durante 15 min.

La Figura 3.4 (a) muestra las medidas de la cabina de metacrilato con una altura de 257 mm, largo de 600 mm y ancho de 257 mm, con una pestaña en la parte inferior 620 mm con un ancho de 3 mm. En la pared lateral de la cabina se encuentran los ventiladores, con espacio de 80 mm de cada lado del ventilador, con una distancia de 150 mm entre cada una.

El baño térmico tiene 729 mm de largo, 159 mm de altura y 267 mm de ancho, en el lado izquierdo tiene un panel de control de temperatura, con medidas de 129.50 mm de largo y 114.50 mm, como se observa en la Figura 3.4 (a). Por otra parte, en

la Figura 3.4 (b) representa el diseño con escala 1:10 y con vista tridimensional, donde se observa el baño térmico con la cabina de metacrilato.

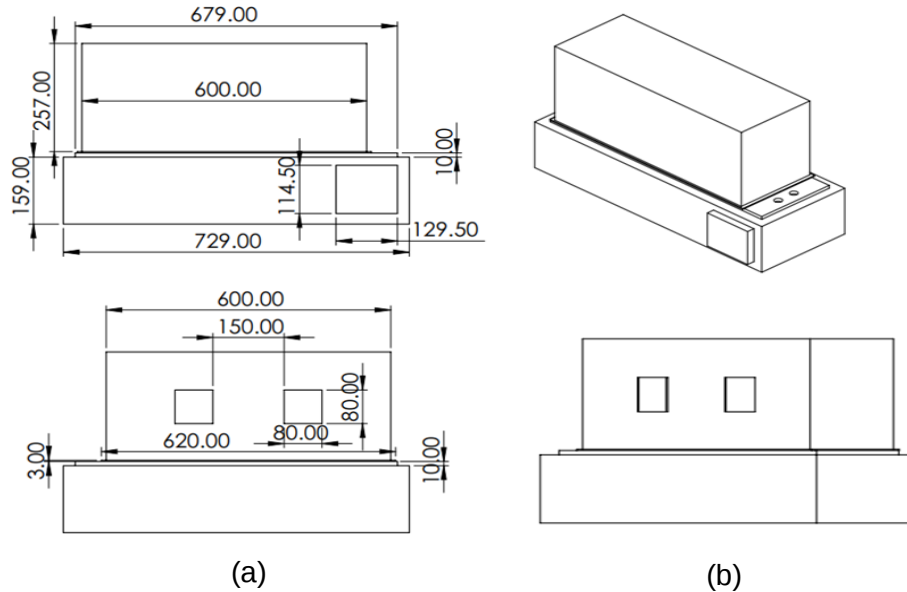


Figura 3.4 (a) Diseño de cabina de metacrilato en secador de ventana de refractancia con medidas y (b) diseño de secado con ventana de refractancia a escala 1:10.

3.2.1 Cinéticas de secado en mesocarpio de sandía y tomate.

Para el modelado del secado de ventana de refractancia se requiere de las cinéticas de secado obtenidas del proceso de secado, y de acuerdo con los distintos factores planteados, como los espesores y las temperaturas empleadas, se obtuvieron las siguientes gráficas en la Figura 3.5 para muestras de pulpa de mesocarpio de sandía se observa la pérdida de peso en espesores de 3, 5 y 7 mm a las tres temperaturas estudiadas respecto al tiempo. Se obtuvo un tiempo promedio de 240 min para que la muestra con pérdidas de peso de aproximadamente 95%, y en espesores de 3 mm, el tiempo promedio de 120 min, donde la pérdida de peso fue mayor respecto a los otros espesores. Asimismo, se observa en la Figura 3.5 (c), que el periodo inicial de secado en las muestras sometidas a 75°C indicó que la pérdida de peso fue menor los primeros 90 min del tratamiento, en comparación de

las muestras sometidas a 65°C. Se observa que los mejores ajustes fueron con espesor de 3 mm, destacando el tratamiento M3-85 con R^2 de 0.8643.

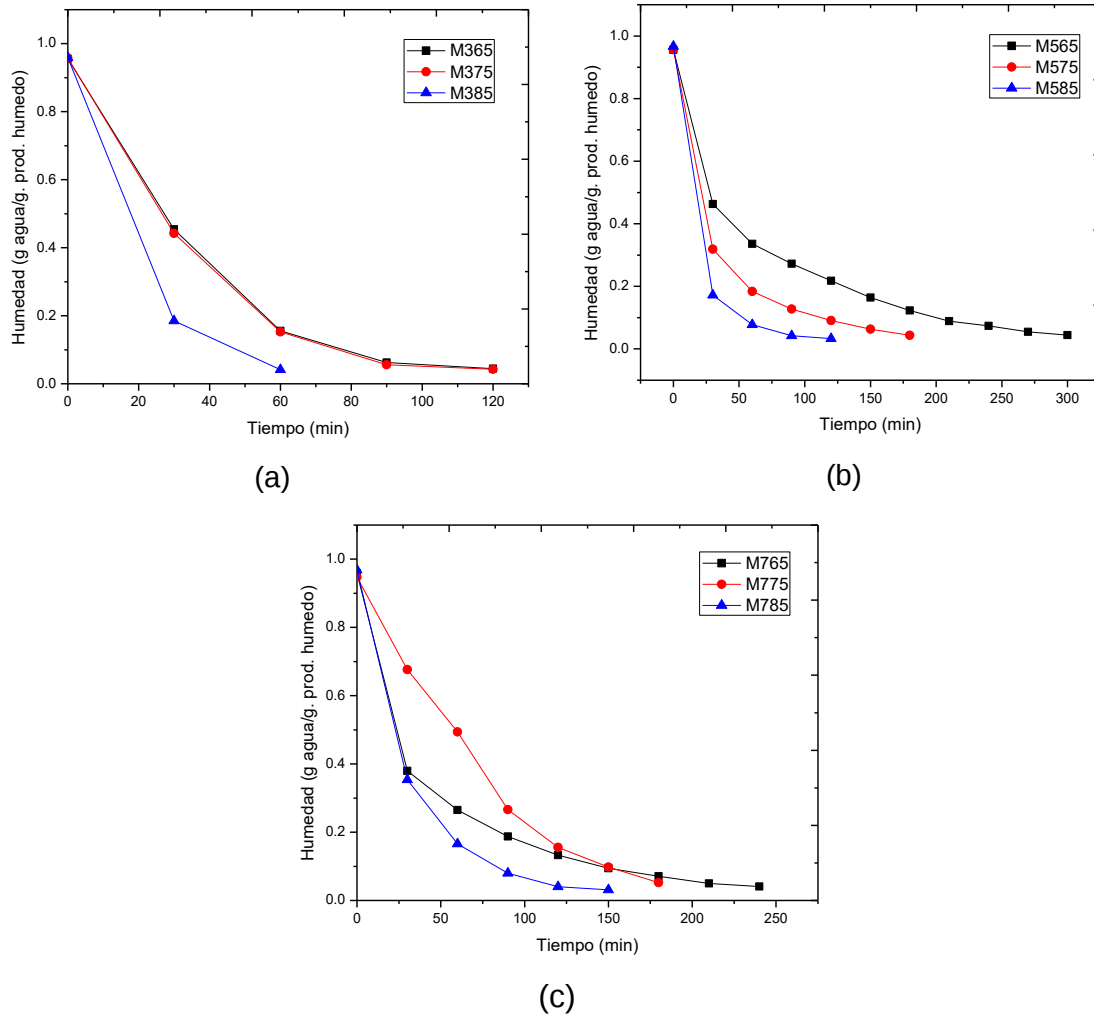


Figura 3.5 Gráfica de secado VR en pulpa de mesocarpio de sandía: (a) con espesor de 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm.

Por otra parte, se realizó la misma experimentación con la modificación en el secador, observándose caídas de velocidad drásticas en los primeros 30 min en muestras con espesor de 3 mm y en 90 min en las muestras con 5 y 7 mm, tiempos más prolongados y con ajustes menores, como se ve en la Figura 3.6 (a), (b) y (c), con ajuste de R^2 de 0.7577 en las mismas condiciones en las muestras (M3-85).

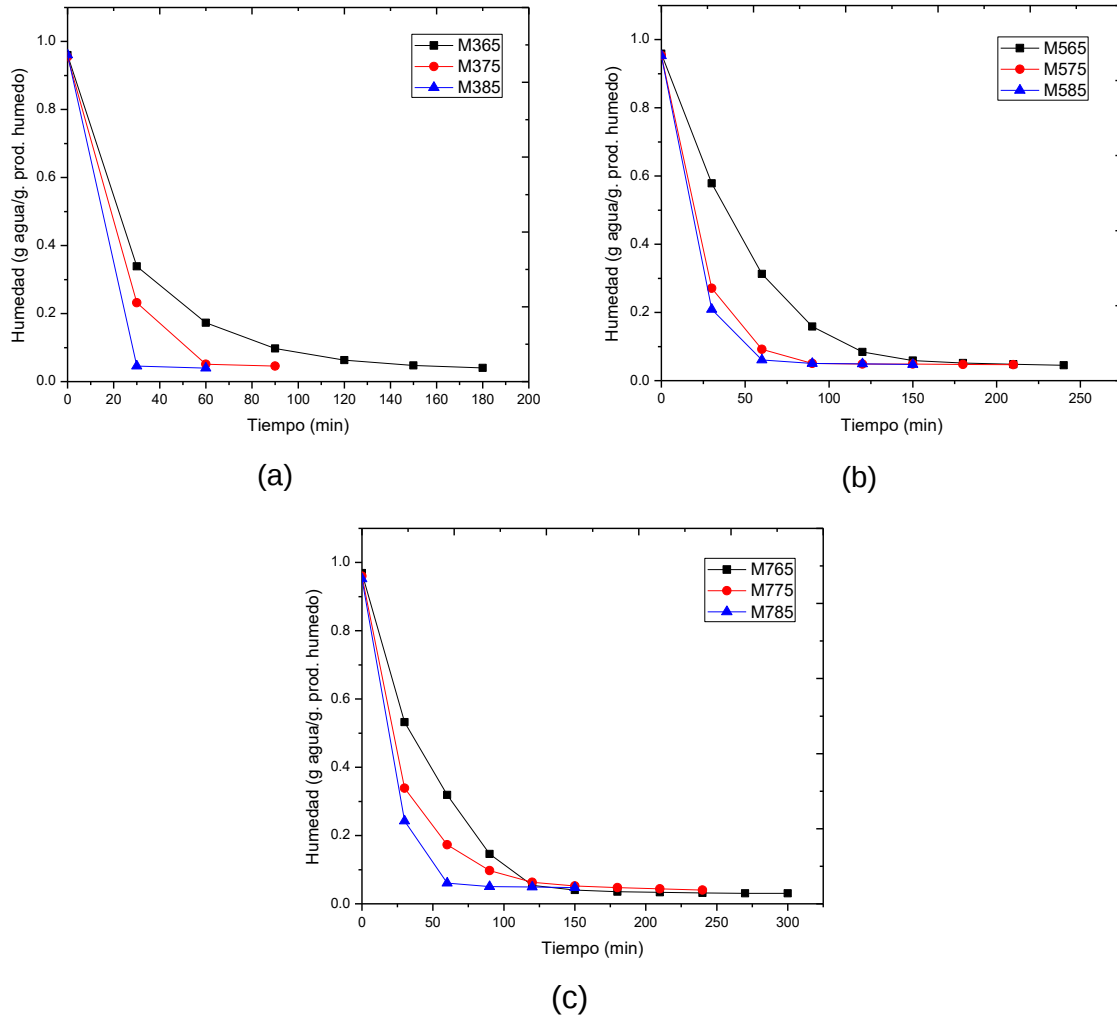


Figura 3.6 Gráfica de secado VR con cabina en mesocarpio de sandía: (a) con espesor de 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm.

En secado de charolas, las caídas de peso durante el proceso no fueron tan constantes o drásticas, como se aprecia en la Figura 3.7 (a) además de, observarse que no hay una diferencia marcada en las curvas de los tratamientos a 85 y 75°C, mostrando que a partir de 75°C se pueden tener menores tiempos de secado a espesores menores. Por otro lado, se obtuvieron tiempos de secado más largos en comparación del secado de ventana de refractancia a mayores espesores, como se observa en la Figura 3.7 (b) y (c), donde, el periodo de secado superó los 250 min en ambas condiciones.

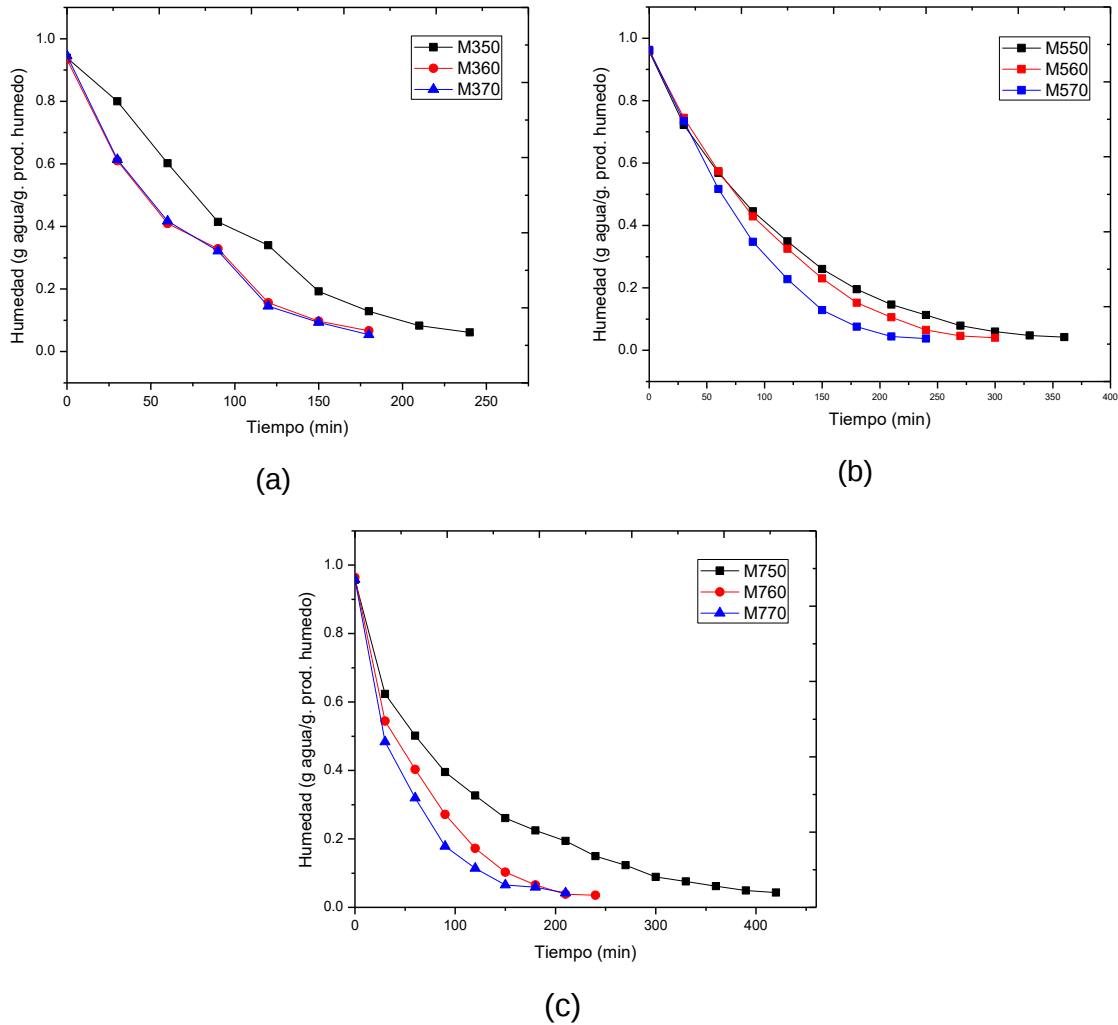


Figura 3.7 Gráfica de secado de charolas en mesocarpio de sandía: (a) con espesor de 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm.

Para la pulpa de tomate, en la Figura 3.8 (a), se observa que el comportamiento en pulpa de 3 mm a 85°C y 75°C fueron parecidos, lográndose obtener resultados parecidos en un promedio de tiempo de 60 min, mientras que las muestras expuestas a 65°C requirieron del doble de tiempo. Se tuvieron los mejores ajustes R^2 con las muestras de 3 mm, con rangos de 0.9174 a 0.8688 g agua/g producto húmedo.

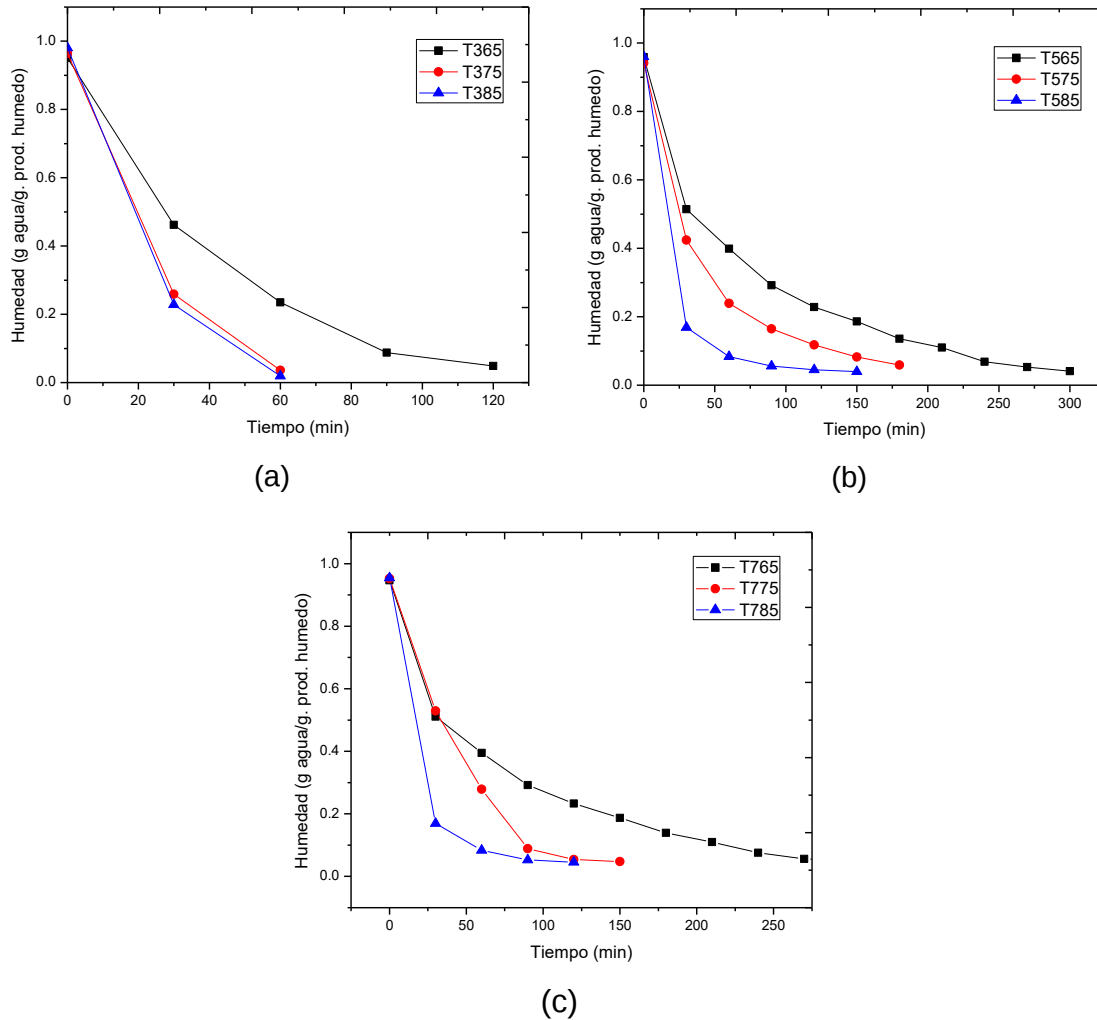


Figura 3.8 Gráfica de secado VR en pulpa de tomate: (a) con espesor de 3 mm, (b) con espesor de 5 mm y (c) con espesor de 7 mm.

En la Figura 3.9, se muestran pérdidas de peso en tomate secado por VR con cabina, donde el mayor tiempo requerido para secado fue para las rodajas con 7 mm de espesor a 65°C, con 450 min, como se observa en la Figura 3.9 (c). Para dichas muestras, se observó que el mejor valor de R^2 fue el obtenido en espesores de 7 mm, donde el mejor valor fue 0.8508, a 85°C.

El tomate al ser un alimento con alto porcentaje de agua interna y poseer una estructura menos firme en contraste del mesocarpio de sandía, se pudo observar caídas de peso más pronunciadas.

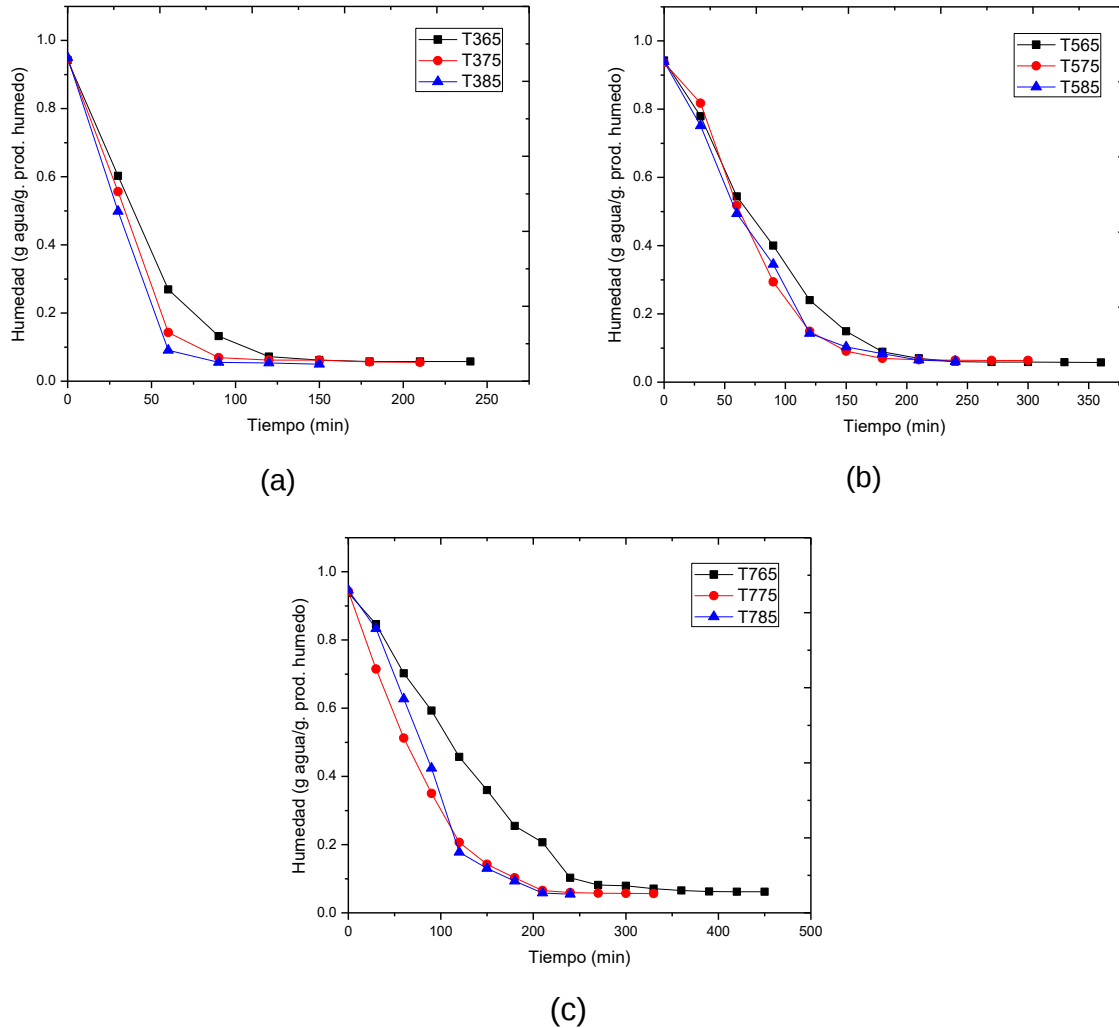


Figura 3.9 Gráfica de secado VR con cabina de pulpa de tomate: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm.

En la Figura 3.10, se observan las cinéticas del tomate en secado de charolas, donde, al igual que en las muestras de mesocarpio, se aprecia que el secado por charolas requiere mayores tiempos de secado para lograr alcanzar las mismas condiciones que las muestras secado por VR, *v. gr.*, las muestras deshidratadas a 85°C lograron una humedad inferior a 0.0604 y 0.0584 g agua/g producto húmedo (véase Apéndice A) en espesores de 5 y 7 mm, respectivamente, en un tiempo de 240 min, en comparación de la muestra con 3 mm de espesor, lograron un valor similar al cabo de 150 min, como se aprecia en la Figura 3.10 (a), además de obtener actividad de agua inferiores o iguales a 0.4.

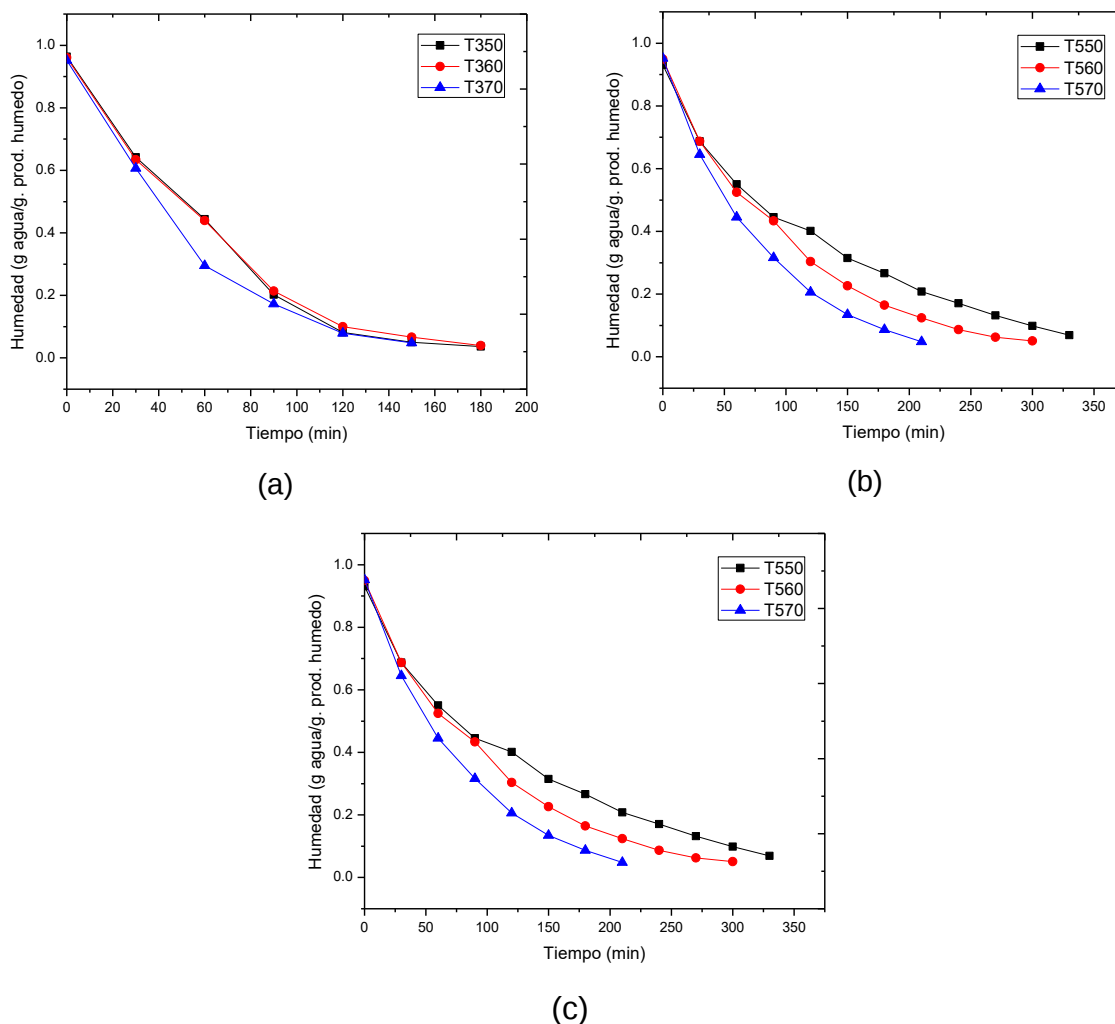


Figura 3.10 Gráfica de secado de charolas en tomate: con espesor de (a) 3 mm, (b) 5 mm y (c) 7 mm.

3.2.2 Modelación matemática

La modelación matemática en alimentos como sandía o tomate puede verse afectada con la constitución física del alimento, dado que, al no ser homogénea, puede afectar el fenómeno de transporte durante el secado. Realizándose los modelos propuestos en el capítulo 1 para ambos tipos de secado en mesocarpio de sandía, se obtuvieron ajustes en los modelos de Lewis y de Page, sin embargo, no fue lo mismo en los demás modelos, esto posiblemente por la incorporación de variables en las ecuaciones que conflictúan la convergencia de estos.

Por otro lado, se calculó el coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y ji-cuadrada (χ^2) con ayuda del software Excel. Los resultados obtenidos para cada experimento de ambos tipos de secado se encuentran resumidos en el Apéndice D.

En mesocarpio de sandía, el modelo de Page en secado de charolas mostró ajustes superiores al 0.90 en las muestras con espesor de 3 mm, con valores de $0.9113 > R^2 > 0.9785$, donde, el RSME más bajo fue obtenido en la muestra deshidratada a 70°C, con 0.0709. Para secado de ventana de refractancia, fue el mismo caso, los mejores ajustes fueron con el menor espesor, con $0.8335 > R^2 > 0.8680$, y el RSME más bajo fue con 85°C con 0.00059. Para el modelo de Lewis, se observaron ajustes superiores a 0.90 en los experimentos a M370 (0.9182), M350 (0.9636), M560 (0.9139), M550 (0.9139), donde el RSME fue el mismo en todas las muestras con 3 mm, es decir, 0.0772, mientras que, el secado de ventana de refractancia, el mejor ajuste fue de 0.9274 en las condiciones de 7 mm y 75°C, resaltando las muestras a 3 mm con R^2 de 0.8680, 0.8339 y 0.8386, respectivamente.

Para el modelo de Weibull, en secado de charolas los ajustes fueron menores a 0.8785, mientras que en ventana de refractancia el mejor ajuste fue con 0.9274, que son inferiores a los obtenidos por Oluwadara (2019) y Guan *et al.* (2021), que obtuvieron ajustes superiores en R^2 de 0.997 y rangos de $0.023 > RMSE > 0.551$ en secado por charolas. De manera general, se obtuvieron buenos ajustes en los tres modelos realizados, sin embargo, el modelo de Page destacó por tener valores superiores, y entre ambos secados, el de charolas mejores valores de R^2 y RMSE.

En comparación de Portela *et al.* (2015), que en secado de charolas obtuvieron mediante el modelo de Page una $R^2 < 0.9999$, los valores obtenidos fueron alejados, contrario a lo obtenido por Isa *et al.* (2021) en pulpa de sandía secado mediante por el mismo método, que obtuvieron $0.884 > R^2 > 0.8999$ y $0.0788 > RMSE > 0.1876$ en el modelo de Lewis, mientras que, para el modelo de Page, obtuvieron $0.8855 > R^2 > 0.9969$ y $0.0256 > RMSE > 0.0923$, siendo estos valores cercanos a los del mesocarpio de sandía en la presente investigación.

En tomate, el modelo de Page, el mejor ajuste en secado de charolas fue obtenido en las muestras de 5 mm a 50°C, con 0.9042 y 7 mm a 60°C con 0.9109, con RMSE de 0.09828 y 0.138141, respectivamente; mientras que, para secado por ventana de refractancia, los mejores ajustes se lograron con las dos temperaturas más altas en el espesor de 3 mm, con valores de R^2 de 0.9037 y 0.9174, y RMSE de 0.01931 y 0.036. Sin embargo, el uso de la cabina de metacrilato no indicó una mejora en los ajustes dado que, con espesores de 5 y 7 mm a la máxima temperatura (85°C) los mayores ajustes fueron de 0.8480 y 0.8508 en R^2 , y RMSE de 0.9903 y 0.01245, respectivamente. Estos valores, difieren de lo reportado por López-Vidaña *et al.* (2020), que obtuvieron R^2 de 0.9969 y RMSE inferiores (0.0029 y 0.0012) en el modelo de Page y por Azeez *et al.* (2021), que en secado de charolas obtuvo $0.9952 < R^2 < 0.9785$ para el modelo de Page, y $0.9836 < R^2 < 0.9423$ en el modelo de Lewis.

En el caso de Lewis, destacan los tres experimentos a 5 y 7mm fueron, con ajustes superiores de 0.88 en charolas, siendo el mayor la muestra a 60°C con el mayor espesor, aunque, para ventana de refractancia, se obtuvo ajustes superiores a 0.90 para el menor espesor a 85 y 75°C en el secado sin la cabina de metacrilato, contrario a lo obtenido con el uso de la cabina, donde, los ajustes en general no fueron mayores a 0.85.

Finalmente, con el modelo de Weibull, se obtuvo en charolas rangos de R^2 de $0.9272 < R^2 < 0.8789$ y $0.056 < RMSE < 0.098$, comparado con López-Quiroga *et al.* (2019), con R^2 de 0.999 y 0.998 y $0.096 < RMSE < 0.068$ para tomate deshidratados mediante liofilización. Con estos resultados, se puede determinar que el modelo de Page es la mejor opción para ajustar el MR experimental.

Otros estudios han utilizado modelos distintos y reportan ajustes viables, como Guemouni *et al.* (2022), que obtuvieron valores de 0.9943 a 0.9976 en R^2 y RMSE de 0.000393 a 0.018021 en rebanas de tomate con el modelo de Fernando y Amarasinghe.

3.2.3 Coeficientes de transferencia

De la pérdida de humedad en cada muestra, es posible calcular coeficientes de transferencia como difusividad efectiva (D_{eff}), capacidad calorífica (C_p) o conductividad térmica (k), como se muestran en el Apéndice B, los cuales fueron calculados de acuerdo con las fórmulas mencionadas en el capítulo 2.

La difusividad efectiva en las muestras de mesocarpio de sandía osciló entre valores de 9.6007×10^{-10} a 1.1995×10^{-9} m²/s en secado por ventana de refractancia y 9.7173×10^{-10} a 1.6742×10^{-10} m²/s en secado de charolas, coincidiendo con Cambuy-Siqueira *et al.* (2020) en las semillas de sandía secadas por secado solar, al reportar valores de 7.6984×10^{-10} y 1.27585×10^{-9} m²/s para temperaturas de 40 a 60°C, o con Leite (2022), que menciona rango de 4.21 a 7.97×10^{-10} m²/s. En la Figura 3.11 (a) se observa las difusividades efectivas en los secados realizados en mesocarpio de sandía, donde se observan valores distribuidos para ambos tipos de secado. Para tomate se pueden apreciar difusividades relativamente mayores en las muestras deshidratadas por VR, como se ve en la Figura 3.11 (b).

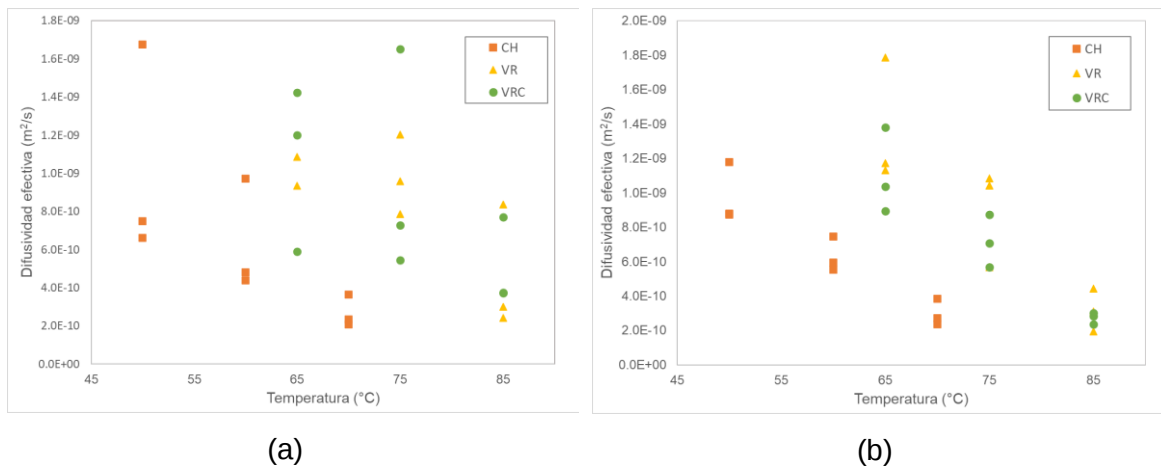


Figura 3.11 Gráfica de difusividad efectiva vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate.

Por otro lado, la energía de activación en tomate se observa en la Figura 3.12, donde, se registraron valores de 12.4380 a 14.4412 kJ/mol en ambos tipos de secado. Esto concuerda con Cambuy-Siqueira *et al.* (2020), Hoque y Iqbal (2015) e Isa *et al.* (2021), que obtuvieron valores de 12.26 kJ mol⁻¹, 19.95 kcal/ g mol y 10.55-14.40 kJ/mol, respectivamente. En alimentos, que energías de activación suelen ser

de 12.7 a 110 kJ mol⁻¹ (Leite *et al.*, 2022), donde, rangos bajos indican un producto térmicamente estable (Montanuci *et al.*, 2013).

Para tomate, se observan los valores obtenidos de difusividad entre 1.0378×10^{-9} m²/s a 8.9289×10^{-10} m²/s en secado por ventana de refractancia, y en charolas 8.7792×10^{-10} m²/s a 1.1783×10^{-9} m²/s se puede observar diferencia en comparación de datos reportados por Dermesonlouoglou *et al.* (2019) donde las difusividades efectivas obtenidas en temperaturas de 35 a 55°C fueron de 2.19×10^{-9} m²/s a 7.57×10^{-9} m²/s y energía de activación de 18.3 a 26.6 kJ/mol, o por Djebli *et al.* (2019), con rango de difusividades de 1.25 a 5.90×10^{-9} m²/s y energía de activación de 1.21 a 3.90×10^5 J/mol en rebanadas de tomate deshidratadas mediante secador solar. Elavarasan *et al.* (2021), obtuvo en tomate secado por secador solar, difusividades de 3.84×10^{-9} a 5.87×10^{-9} m²/s y energías de activación de 36.87 a 46.44 kJ/mol. Kipcak y Doymaz (2020) evaluaron tomate en secado infrarrojo y obtuvieron 7.33×10^{-9} m²/s a 8.24×10^{-9} m²/s y energía de activación de 0.3162 Kw/KG. Bajas energías de activación significan difusividades de humedad o coeficientes de transferencia de masa más altos (Darvishi *et al.*, 2018).

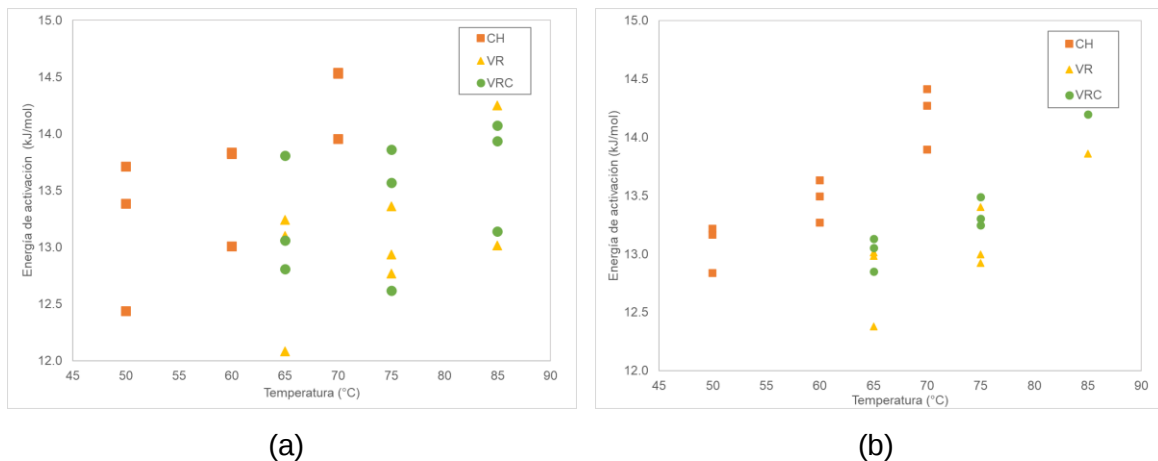


Figura 3.12 Gráfica de energía de activación vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate.

La capacidad calorífica en ambos alimentos se observa en la Figura 3.13 (a) y (b), obteniendo un promedio de valores de 0.94 a 1.05 kJ/ kg °C, en el caso del mesocarpio, se pueden observar mayores capacidades caloríficas para el secado VR, destacando el secado con la cabina de metacrilato. Para tomate, se aprecia el

mismo comportamiento, con la diferencia de observarse difusividades mayores con el secado VR con cabina de metacrilato.

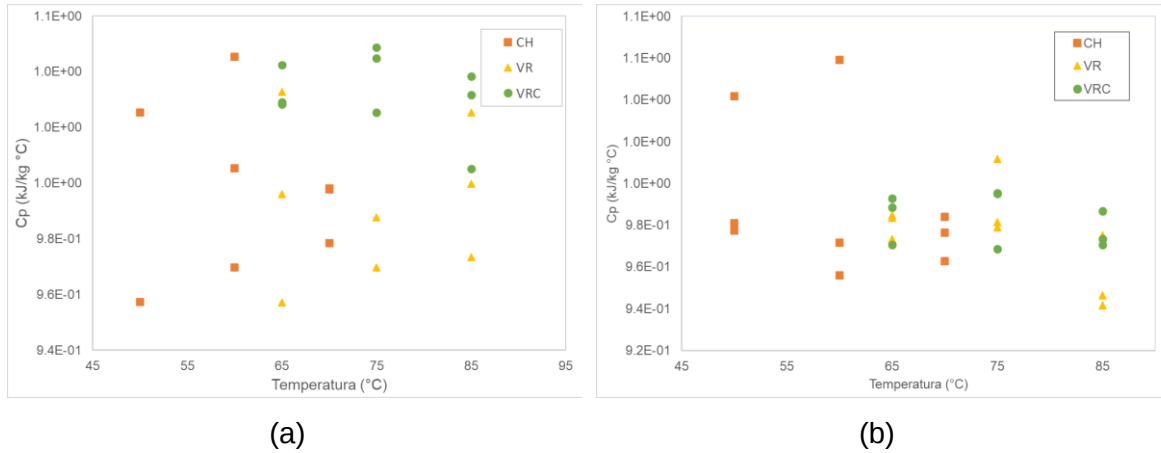


Figura 3.13 Gráfica de capacidad calorífica vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate.

La conductividad térmica en ambos alimentos no varió significativamente, dado que ambos obtuvieron rangos promedios de 0.16 a 0.188 W/m°C, en la Figura 3.14 (a) se observa que en mesocarpio de sandía las mayores conductividades fueron con secado de charolas y las menores con ventana de refractancia sin cabina, mientras que, para tomate, la dispersión de datos se aprecia en cada tipo de secado, donde todos obtuvieron valores altos y bajos de conductividad, como aprecia en la Figura 3.14 (b).

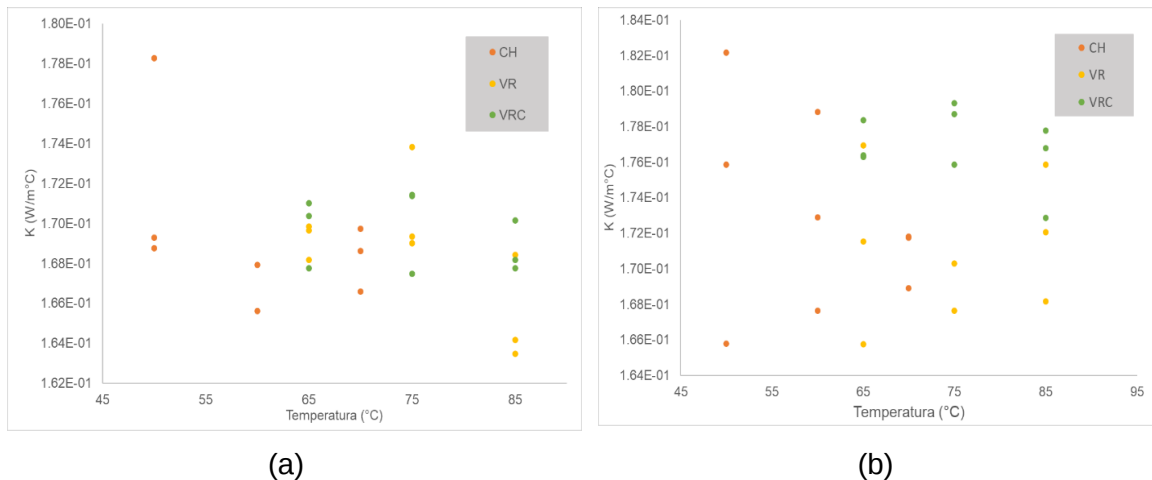


Figura 3.14 Gráfica de conductividad térmica vs temperatura en (a) mesocarpio de sandía y (b) tomate.

Por otro lado, el análisis ANOVA para estos coeficientes determinó que factores como la temperatura y el espesor aplicados en el secado de la muestra tienen influencia en la difusividad y la energía de activación, al determinarse P-valores menores de 0.001 (0.000-0.001).

3.3 Retención de compuestos

Mediante el equipo Nicolet iS5, se realizaron mediciones FTIR en muestras de mesocarpio de sandía y tomate deshidratados por secado de charolas y de ventana de refractancia, cuyos resultados se encuentran en el Apéndice C. En la Figura 3.15 se aprecia el espectro obtenido en la muestra de mesocarpio de sandia sin cabina de metacrilato, donde, se aprecian ondas prominentes en diversas regiones, destacando valores de 3776.92, 3451.51, 3420.81 y 3374.78, de acuerdo con autores como Kumar-Patle *et al.* (2020) y Bichi *et al.* (2022), señalan que rangos de 3700-3200 cm^{-1} , pertenecen a grupos funcionales O-H como alcoholes, ácidos carboxílicos, nitratos, además de la presencia de fenoles en la muestra. Picos intensos alrededor de la región mencionada también puede indicar la presencia de celulosa, pectina y lignina (Lakshmipathy y Sarada, 2015; Zhuang *et al.*, 2020), por otro, bandas ascendentes en regiones de 1320-1230 cm^{-1} pertenecen a estiramientos C-O, pertenecientes de ácidos carboxílicos y a fenoles, específicamente, en la región 1260-1200 cm^{-1} (Asemani y Reza-Rabbani, 2020), como se ve en la Figura 3.15. Otro compuesto de importancia en el presente estudio es el caroteno, que de acuerdo con Martínez *et al.* (2020), picos en la región de 1400 son usualmente causados por la flexión y vibración de metileno C-H, asociado a los pigmentos de licopeno.

En la Figura 3.16 se muestra el espectro con la muestra de mesocarpio de sandía deshidratado mediante el mismo secado y con la cabina de metacrilato, y comparando con la Figura 3.15, se ve semejanza en los picos en regiones de 3500-3000 cm^{-1} y 1000-1400 cm^{-1} , indicando la retención de compuestos orgánicos como polifenoles, licopeno o carotenoide, además de observarse la curva en la región de 1500-1600 cm^{-1} se es mayor en la muestra deshidratada sin cabina, relacionada al grupo C=C (alqueno disustituido).

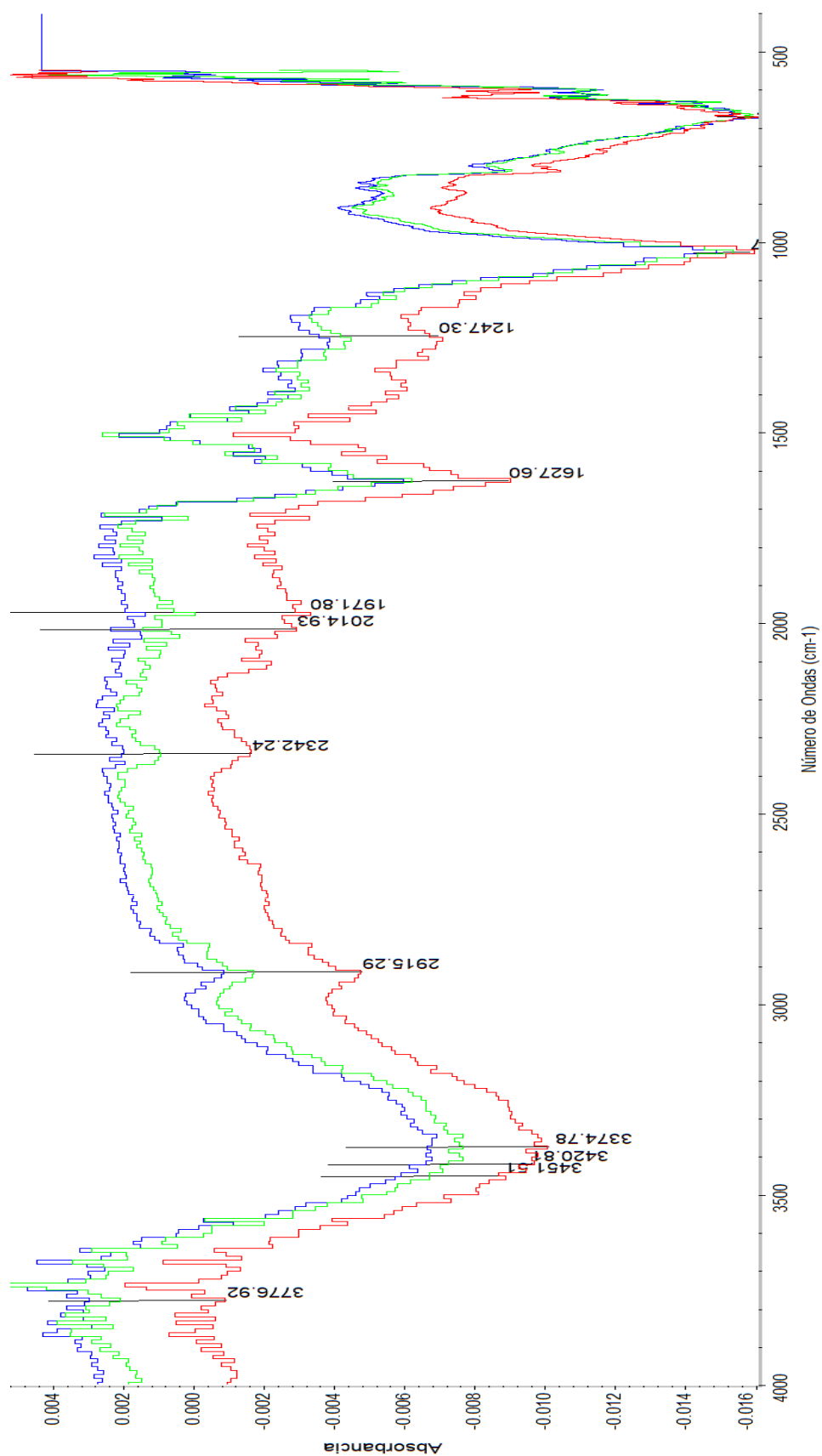


Figura 3.15 Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado VR sin cabina

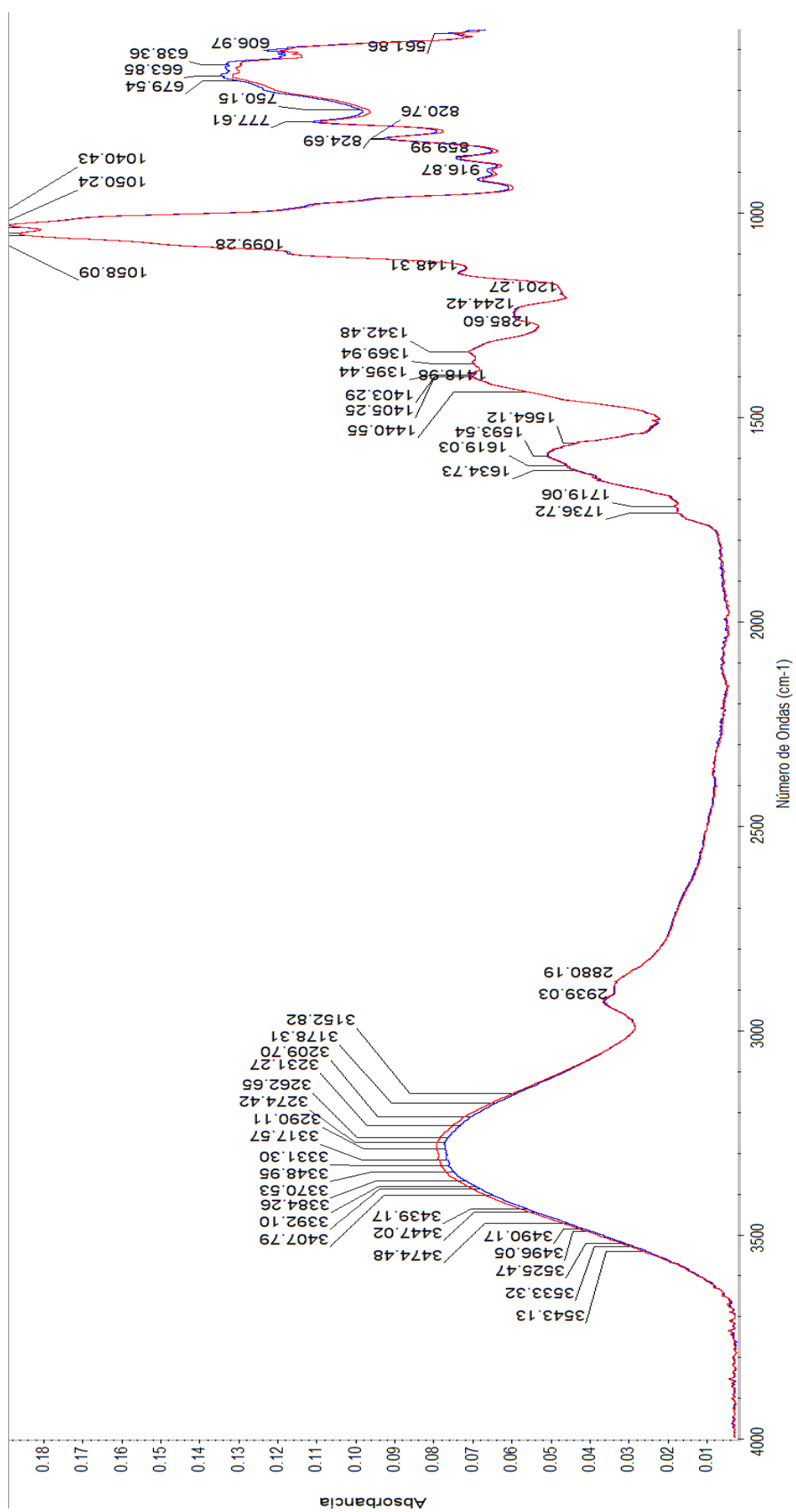


Figura 3.16 Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado VR con cabina.

El espectro obtenido del mesocarpio de sandía deshidratado por secado de charolas se muestra en la Figura 3.17, donde, se observa que los picos coinciden en las mismas regiones que las muestras obtenidas por secado por ventana de refractancia, no obstante, la amplitud de las ondas son menores en regiones características de polifenoles, licopeno y carotenoides (1400 , $1000-1200\text{ cm}^{-1}$), obteniéndose áreas como 4.08 vs 12.67 cm^{-1} en la región de $3200-3700\text{ cm}^{-1}$, 0.61 vs 0.76 en la región $1400-1500\text{ cm}^{-1}$ y 4.16 vs 0.82 en las región $1000-1100\text{ cm}^{-1}$.

Con las muestras de tomate se obtuvieron picos prominentes en diversas regiones del espectro, denotando regiones de 3358.76 hasta 3241.08 cm^{-1} , como se aprecia en la Figura 3.18, donde anteriormente se ha mencionado que pertenece a compuestos como alcoholes, aminas y ácidos carboxílicos, también relacionados a la presencia de polifenoles en la muestra.

Otros picos importantes, se encuentran en la región de 1418.98 y 1415.05 cm^{-1} , los cuales puede señalar la presencia de licopeno (Sinthia-Dewi *et al.*, 2018) o los picos 1052.20 y 1024.74 cm^{-1} , cuya amplitud confirma la existencia de carotenoides, característicos en regiones de $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ (Kainat *et al.*, 2022).

En la Figura 3.19 se observa el espectro de la muestra de tomate deshidratado cabina, se obtuvieron picos en las mismas regiones, esto puede demostrar que la retención de los compuestos mencionados no se ve afectada por factores como el uso de cabina en el secado.

Por otro lado, en el secado de charolas, el espectro obtenido no mostró curvas tan definidas como los espectros obtenidos en las muestras deshidratadas por secado por ventana de refractancia, como se aprecia en la Figura 3.20, donde se observaron picos en la región de $1400-1500\text{ cm}^{-1}$, característicos del licopeno, sin embargo, se nota la ausencia de la curva característica del grupo de polifenoles ($3700-3200\text{ cm}^{-1}$) y de carotenoides ($1000-1200\text{ cm}^{-1}$).

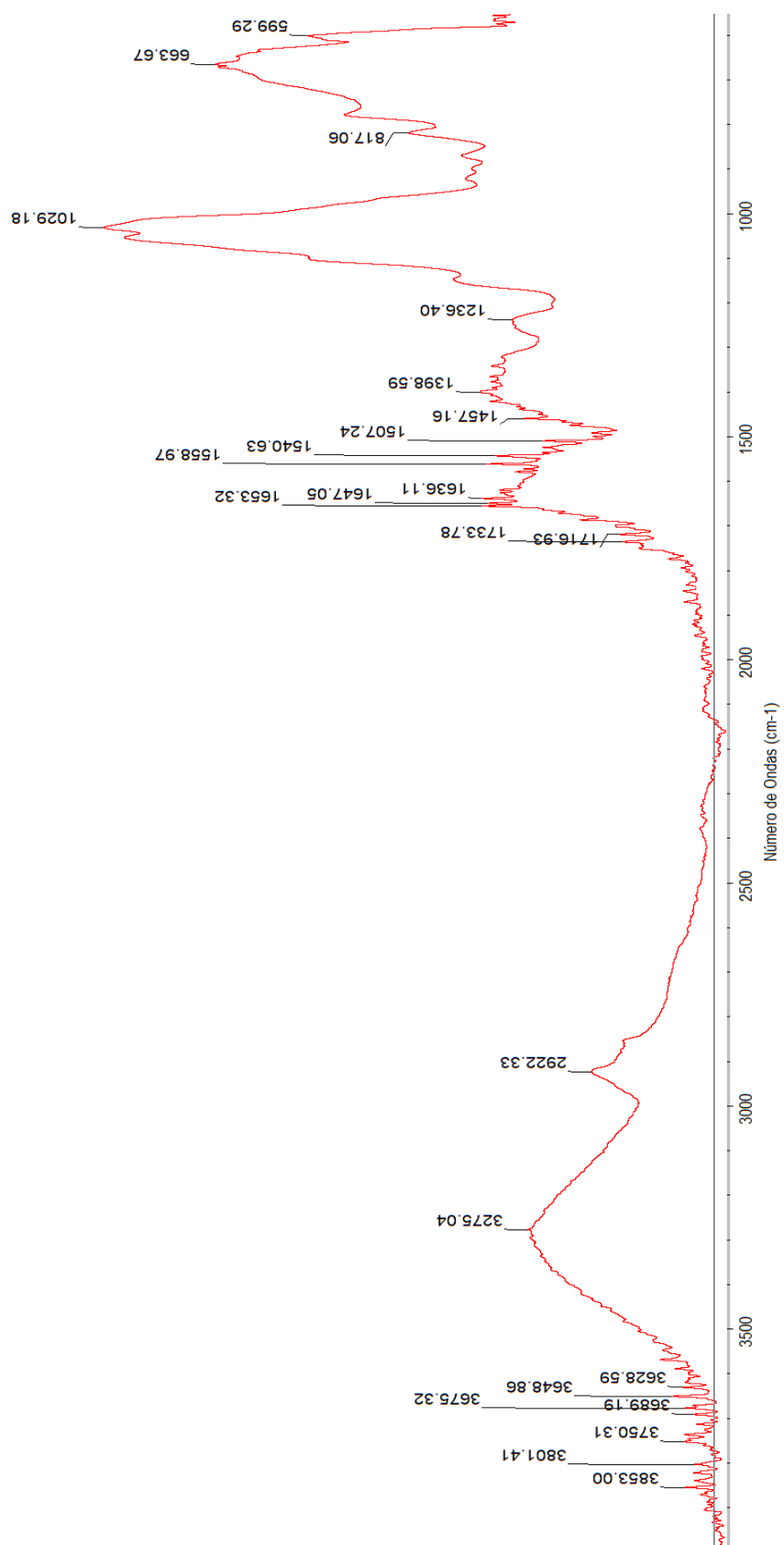


Figura 3.17 Espectro FT-IR de mesocarpio de sandía por secado de charolas.

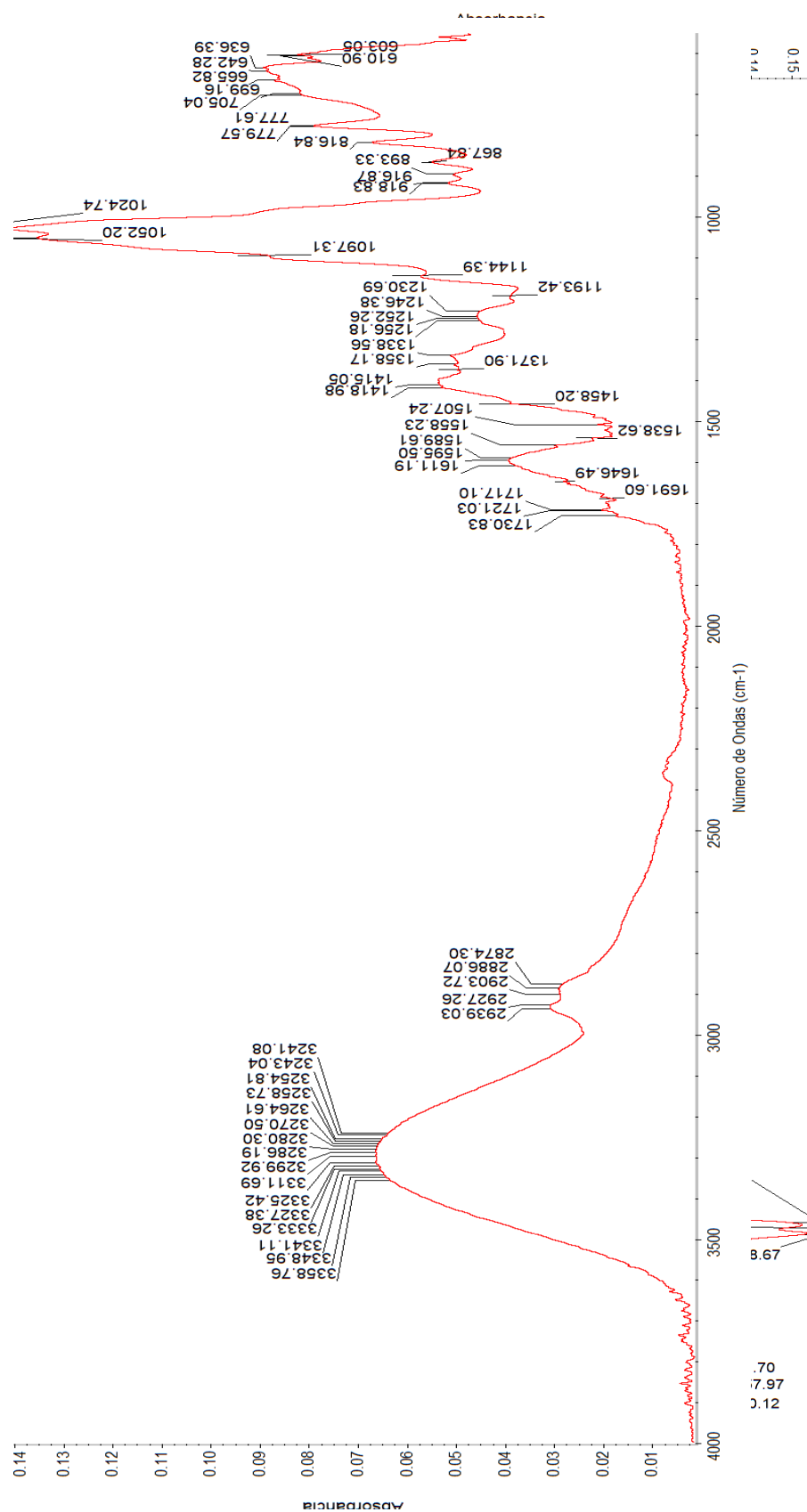


Figura 3.18 Espectro FT-IR de tomate por secado VR sin cabina.

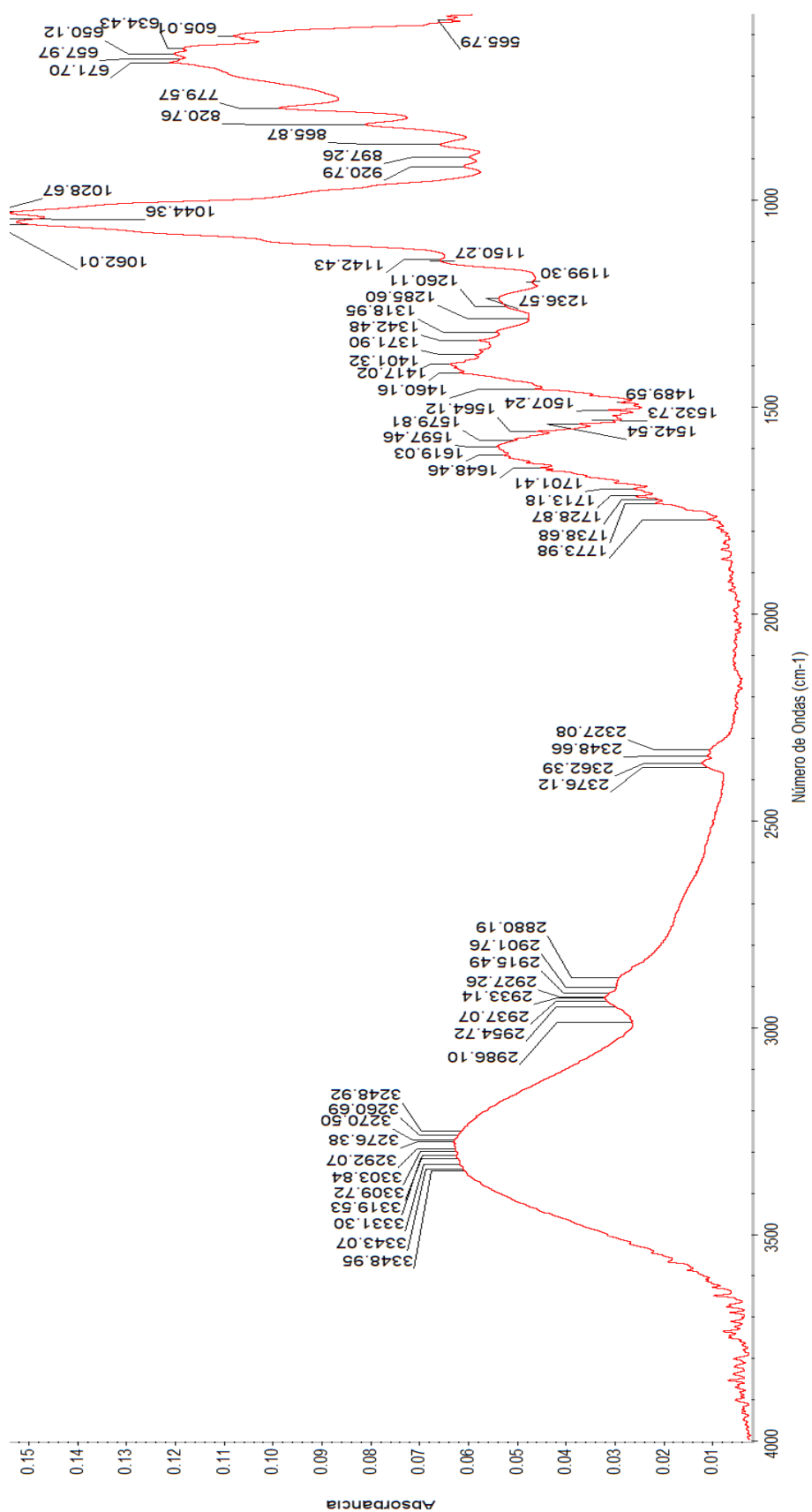


Figura 3.19 Espectro de tomate por secado VR con cabina.

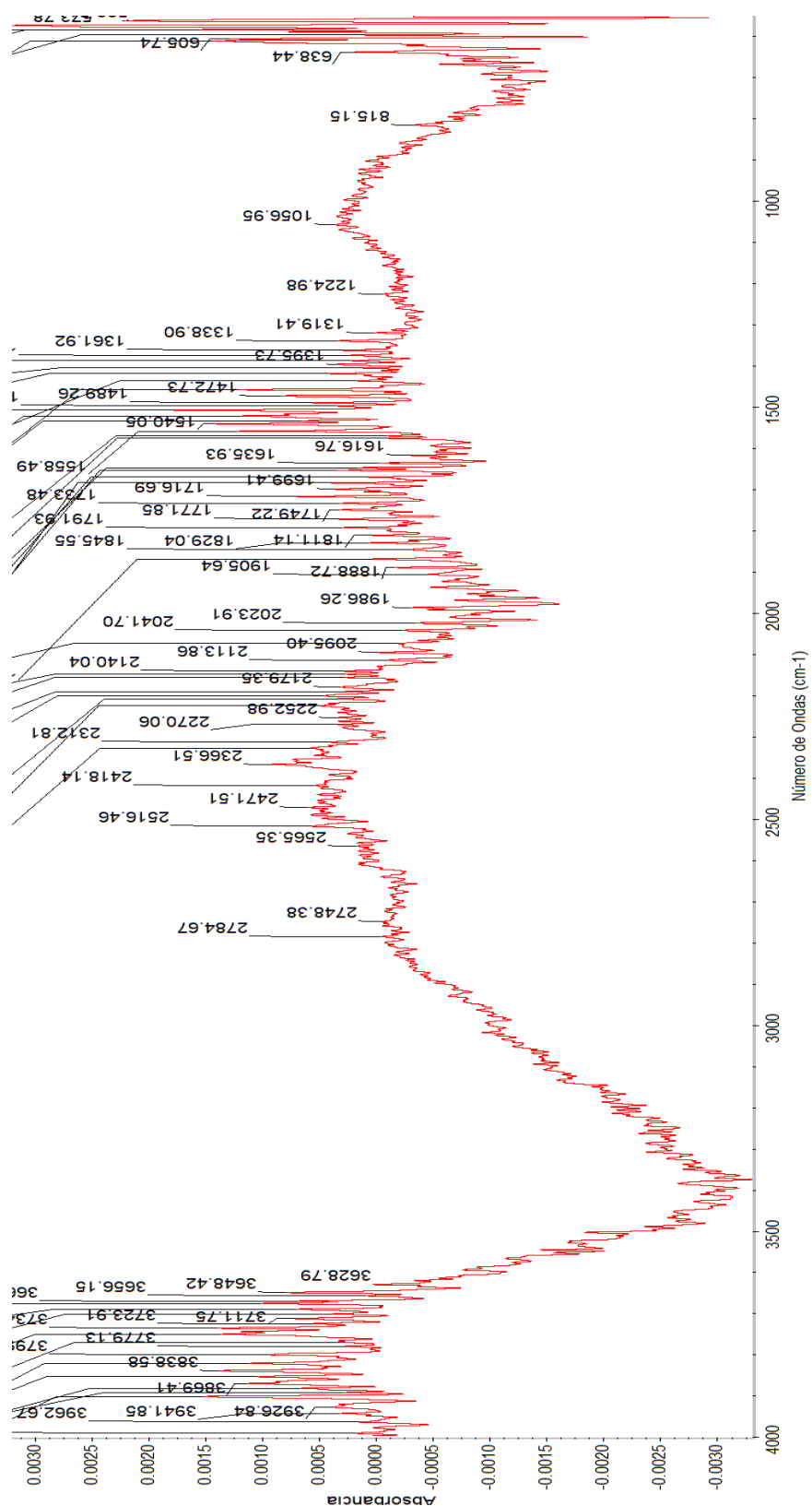


Figura 3.20 Espectro de tomate por secado de charolas.

3.4 Obtención de imágenes

Obtenidas las muestras deshidratadas, se analizaron las imágenes de la morfología a través del microscopio, como se aprecia a continuación. De dichas imágenes se obtuvieron áreas, perímetros y circunferencias mediante el software ImageJ.

La muestra fresca de mesocarpio de sandía, mostrada en la Figura 3.21 (a), no muestra una estructura firme en comparación de otros alimentos, debido a la desfibrilación celulósica ocurrida durante la adecuación (licuado) del mesocarpio. Con la herramienta de Análisis en Image J se obtuvo promedio de área, perímetro y circunferencia de 595.52, 49.071 y 0.903 nm.

La Figura 3.21 (b) corresponde a la muestra de mesocarpio de sandía deshidratada por ventana de refractancia, donde, se observa la morfología. Se aprecia rugosidad en la superficie, efecto de la deshidratación de la matriz viscoelástica (Oyinloye y Yoon, 2020). Para esta muestra, se obtuvo promedio de área de 426.346, perímetro de 23.195 y circunferencia de 0.894 nm, de esto, se puede observar la disminución de valor en los tres rangos mencionados, haciendo evidente la contracción del alimento ante la exposición a altas temperaturas.

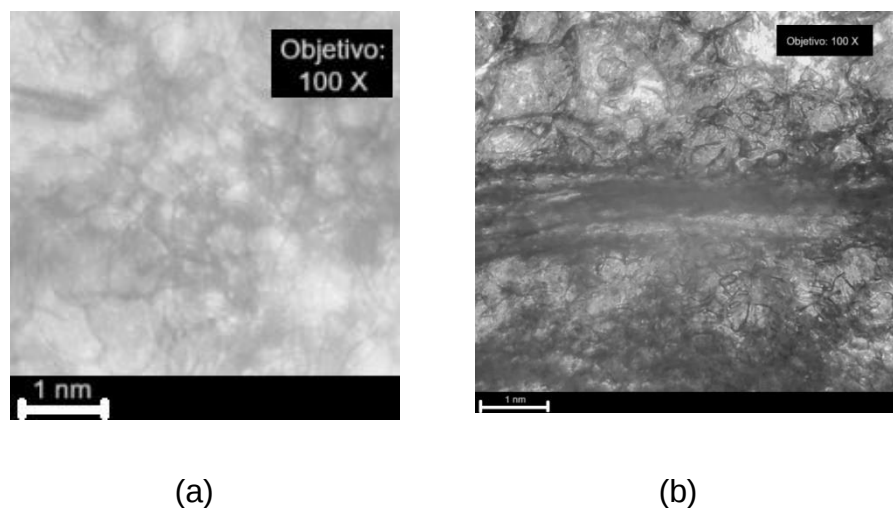


Figura 3.21 Morfología de mesocarpio de sandía (a) fresco y (b) deshidratado a través de ImageJ.

La morfología del tomate es considerada como compleja, la estructura de la pared interna se asemeja a un material fibroso, mientras que la pulpa es similar a un material no poroso, considerándose higroscópico (Ochida *et al.*, 2019). En la Figura 3.22 (a) se aprecia la morfología del tomate natural, donde la estructura de las fibras es continua y firme, caso contrario al tomate deshidratado, en la Figura 3.22 (b), en el que las fibras se han vuelto fibrosas, opacas, con una estructura irregular, consecuencia de la remoción de agua.

Ochida *et al.* (2019) analizó la morfología de tomate mediante SEM, obteniendo resultados parecidos respecto a la muestra fresca y deshidratada del tomate, donde la estructura en fresco luce continuo, firme e intacto, mientras que después del tratamiento, obtuvieron estructuras fibrosas y coloración oscura.

En tomate fresco, las moléculas tuvieron un promedio del área de 581.71, perímetro de 47.734 y circunferencia de 0.874 nm, mientras que en muestras deshidratadas se obtuvo 486.93, 50.21 y 0.853 nm en área, perímetro y circunferencia, observándose una disminución de área y circunferencia, y un aumento en el perímetro, posiblemente por la aplicación del secado.

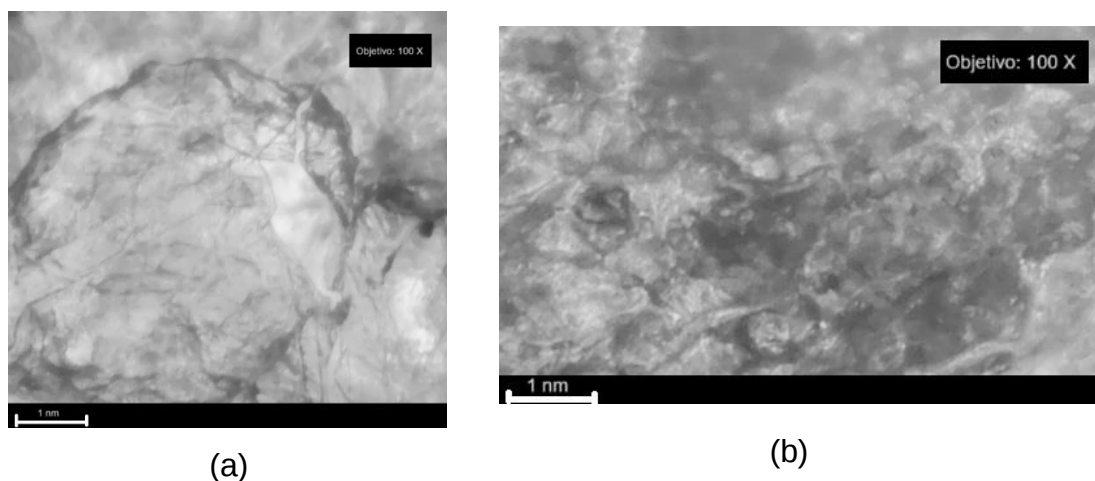


Figura 3.22 Morfología de mesocarpio de tomate (a) fresco y (b) deshidratado a través de ImageJ.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los coeficientes obtenidos mostraron similitudes con reportados con literatura, tal como difusividades efectivas y energía de activación, que son de importancia en la estabilidad de los alimentos. Respecto a la modelación matemática, para ambos alimentos, el modelo de Page indicó mejores ajustes con R^2 de $0.9785 < R^2 < 0.7968$ para el secado de charolas en mesocarpio de sandía, mientras que para el secado de ventana de refractancia, el mejor ajuste fue para las muestras con 3 mm con $0.8680 < R^2 < 0.8334$. Para tomate, en el secado por charolas, los tres modelos utilizados (Lewis, Page y Weibull), obtuvieron ajustes similares entre sí, con R^2 de 0.8789 a 0.9272, mientras que para el secado por ventana de refractancia, los mejores ajustes fueron obtenidos en las muestras con espesor de 3 mm y deshidratadas sin la cabina en los modelos de Page y Lewis, con R^2 de 0.8687 a 0.9174.

Mediante la aplicación de técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se corroboró los compuestos en las muestras del presente trabajo, dado se observaron las longitudes de onda correspondientes a polifenoles, licopeno y carotenoides ($3700-3200, 1400, 1000-1200 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente) en ambas muestras, destacando las obtenidas en el secado por ventana de refractancia al tener mayor amplitud en las curvas, en comparación de las obtenidas en el secado por charolas.

La obtención de imágenes de los alimentos deshidratados resultó de beneficio para confirmar los cambios internos después del secado, demostrándose en la retracción de la fibra celulósica en ambos frutos al obtener reducción de área, perímetro y circunferencia en las fibras debido a la remoción de agua interna en la estructura de los alimentos, además de verificar los cambios de color ocurridos después del tratamiento térmico.

El SVR fue adecuado en rodajas de mesocarpio de sandía con un gap de 3mm a 70° C y un 4h logrando una actividad de agua 0.4018., que corresponde a un alimento de humedad intermedia, favorable para su almacenamiento sin

conservadores, con importante porcentaje de fitonutrientes. Aún resta optimizar el contenido de carotenoides para alcanzar una mayor retención.

RECOMENDACIONES

Se propone la combinación de ambos secados para mejorar el deshidratado de ambos frutos, además de continuar con la deshidratación de diversos alimentos con estructuras diferentes al tomate o mesocarpio para analizar los efectos del secado de ventana de refractancia sobre estos, y finalmente continuar con la modelación matemática con otros modelos como Demir, Fernando y Amarasinghe o Sledz.

Anexos

Apéndice A

A1. Resultados obtenidos en muestras deshidratadas de mesocarpio de sandía.

Exp.	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	aw	Humedad (g agua/g prod. hum.)
M370	3	70	180	0.42	0.0441
M360	3	60	180	0.44	0.0666
M350	3	50	240	0.43	0.0614
M570	5	70	240	0.42	0.0377
M560	5	60	300	0.44	0.0404
M550	5	50	360	0.45	0.0421
M770	7	70	210	0.43	0.0418
M760	7	60	240	0.43	0.0357
M750	7	50	420	0.44	0.0432
M385	3	85	60	0.40	0.0414
M375	3	75	120	0.41	0.0426
M365	3	65	120	0.42	0.0443
M585	5	85	120	0.41	0.0328
M575	5	75	180	0.41	0.0433
M565	5	65	300	0.44	0.0439
M785	7	85	150	0.42	0.0314
M775	7	75	180	0.44	0.0524
M765	7	65	240	0.45	0.0409
MC385	3	85	60	0.31	0.0395
MC375	3	75	90	0.31	0.0454
MC365	3	65	180	0.31	0.0401
MC585	5	85	150	0.31	0.0474
MC575	5	75	210	0.31	0.0467
MC565	5	65	240	0.30	0.0449
MC785	7	85	150	0.37	0.0475
MC775	7	75	240	0.37	0.0401
MC765	7	65	330	0.38	0.0308

A2. Resultados obtenidos en muestras deshidratadas de tomate.

Exp.	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	aw	Humedad (g agua/g prod. hum.)
T370	3	70	150	0.41	0.0482
T360	3	60	180	0.42	0.0398
T350	3	50	180	0.42	0.0361
T570	5	70	210	0.43	0.0483
T560	5	60	300	0.43	0.0505
T550	5	50	330	0.43	0.0693
T770	7	70	210	0.44	0.0424
T760	7	60	240	0.43	0.0625
T750	7	50	420	0.42	0.0565
T385	3	85	60	0.39	0.0193
T375	3	75	60	0.41	0.036
T365	3	65	120	0.42	0.0488
T585	5	85	150	0.40	0.0398
T575	5	75	180	0.41	0.0587
T565	5	65	300	0.41	0.0409
T785	7	85	120	0.41	0.0452
T775	7	75	150	0.43	0.0477
T765	7	65	300	0.44	0.0532
TC385	3	85	210	0.39	0.0504
TC375	3	75	210	0.40	0.0623
TC365	3	65	270	0.40	0.0574
TC585	5	85	240	0.41	0.0604
TC575	5	75	300	0.42	0.0635
TC565	5	65	360	0.41	0.0576
TC785	7	85	240	0.41	0.0584
TC775	7	75	330	0.42	0.0565
TC765	7	65	450	0.41	0.0616

Apéndice B

B1. Propiedades térmicas en muestras de mesocarpio de sandía deshidratadas.

Exp.	Espesor (mm)	T (°C)	Cp (kJ/kg °C)	K (W/m°C)	D _{eff} (m ² /s)	E _a (kJ/mol)
T370	3	70	0.9977	0.1718	3.6438×10 ⁻¹⁰	13.9541
T360	3	60	0.9697	0.1676	9.7173×10 ⁻¹⁰	13.0074
T350	3	50	0.9574	0.1658	1.6742×10 ⁻⁹	12.4380
T570	5	70	0.9981	0.1718	2.0672×10 ⁻¹⁰	14.5299
T560	5	60	1.0054	0.1729	4.3854×10 ⁻¹⁰	13.8316
T550	5	50	1.0681	0.1822	7.4861×10 ⁻¹⁰	13.3836
T770	7	70	0.9784	0.1689	2.3357×10 ⁻¹⁰	14.5361
T760	7	60	1.0454	0.1788	4.8177×10 ⁻¹⁰	13.8197
T750	7	50	1.0254	0.1759	6.6063×10 ⁻¹⁰	13.7086
T385	3	85	1.0254	0.1759	8.3625×10 ⁻¹⁰	13.0150
T375	3	75	0.9014	0.1575	1.2031×10 ⁻⁹	12.7690
T365	3	65	0.9571	0.1657	2.4500×10 ⁻⁹	12.0819
T585	5	85	0.9997	0.1721	3.0094×10 ⁻¹⁰	14.2475
T575	5	75	0.9697	0.1676	7.8646×10 ⁻¹⁰	13.3597
T565	5	65	1.0328	0.1769	9.3508×10 ⁻¹⁰	13.2429
T785	7	85	0.9734	0.1682	2.4300×10 ⁻¹⁰	14.4412
T775	7	75	0.9877	0.1703	9.6007×10 ⁻¹⁰	12.9370
T765	7	65	0.9961	0.1715	1.0872×10 ⁻⁹	13.0977
TC385	3	85	1.0051	0.1728	7.7063×10 ⁻¹⁰	13.1379
TC375	3	75	1.0448	0.1787	1.6528×10 ⁻⁹	12.6154
TC365	3	65	1.0284	0.1763	1.4224×10 ⁻⁹	12.8054
TC585	5	85	1.0384	0.1778	3.7275×10 ⁻¹⁰	13.9357
TC575	5	75	1.0488	0.1793	7.2768×10 ⁻¹⁰	13.5687
TC565	5	65	1.0291	0.1764	1.1995×10 ⁻⁹	13.0589
TC785	7	85	1.0318	0.1768	3.7425×10 ⁻¹⁰	14.0730
TC775	7	75	1.0254	0.1759	5.4427×10 ⁻¹⁰	13.8591
TC765	7	65	1.0424	0.1784	5.9023×10 ⁻¹⁰	13.8056

B2. Propiedades térmicas en muestras de tomate deshidratadas.

Exp.	Espesor (mm)	T (°C)	Cp (kJ/kg °C)	K (W/m°C)	D _{eff} (m ² /s)	E _a (kJ/mol)
M370	3	70	0.9841	0.1697	3.8475×10 ⁻¹⁰	13.8937
M360	3	60	1.0591	0.1808	7.4479×10 ⁻¹⁰	13.2685
M350	3	50	1.0418	0.1783	1.1783×10 ⁻⁹	12.8369
M570	5	70	0.9627	0.1666	2.7214×10 ⁻¹⁰	14.2715
M560	5	60	0.9717	0.1679	5.5313×10 ⁻¹⁰	13.6324
M550	5	50	0.9774	0.1688	8.7792×10 ⁻¹⁰	13.1652
M770	7	70	0.9764	0.1686	2.3732×10 ⁻¹⁰	14.4133
M760	7	60	0.9561	0.1656	5.9479×10 ⁻¹⁰	13.4911
M750	7	50	0.9811	0.1693	8.7354×10 ⁻¹⁰	13.2186
M385	3	85	0.9734	0.1684	1.9313×10 ⁻¹⁰	14.4626
M375	3	75	0.9687	0.1690	5.6875×10 ⁻¹⁰	13.4034
M365	3	65	0.9884	0.1698	1.7865×10 ⁻⁹	12.3797
M585	5	85	0.9707	0.1642	3.1050×10 ⁻¹⁰	14.2901
M575	5	75	0.9951	0.1693	1.0833×10 ⁻⁹	12.9956
M565	5	65	0.9927	0.1696	1.1311×10 ⁻⁹	13.0159
M785	7	85	0.9867	0.1635	4.4438×10 ⁻¹⁰	13.8601
M775	7	75	0.9954	0.1738	1.0438×10 ⁻⁹	12.9215
M765	7	65	0.9707	0.1682	1.1719×10 ⁻⁹	12.9836
MC385	3	85	0.9751	0.1682	2.8446×10 ⁻¹⁰	14.4218
MC375	3	75	0.9791	0.1675	8.7351×10 ⁻¹⁰	13.2490
MC365	3	65	0.9847	0.1704	1.3815×10 ⁻⁹	12.8504
MC585	5	85	0.9464	0.1678	3.0141×10 ⁻¹⁰	14.1971
MC575	5	75	0.9814	0.1714	7.0625×10 ⁻¹⁰	13.3033
MC565	5	65	0.9834	0.1710	1.0378×10 ⁻⁹	13.0529
MC785	7	85	0.9417	0.1701	2.3583×10 ⁻¹⁰	14.4802
MC775	7	75	1.0117	0.1714	5.6723×10 ⁻¹⁰	13.4876
MC765	7	65	0.9734	0.1678	8.9289×10 ⁻¹⁰	13.1322

Apéndice C

C1. Picos de espectro de FT-IR en mesocarpio de sandía en SVR sin cabina.

λ	Tipo de pico	Compuesto
3776.92	O-H tensión	Alcohol
3451.51	O-H tensión	Alcohol
3420.81	N-H tensión	Amina alifática
3374.78	N-H tensión	Amina alifática
2915.29	C-H tensión	
2014.93	N=C=S tensión	Isocianato
1971.80	C-H flexión	Compuestos aromáticos
1627.60	C=C tensión	Alqueno conjugado
1247.30	C-N tensión	Amina

C2. Picos de espectro de FT-IR en tomate en SVR sin cabina.

λ	Tipo de pico	Compuesto
3358.76	O-H tensión	Alcohol
3348.95	O-H tensión	Alcohol
3341.11	O-H tensión	Alcohol
3333.26	O-H tensión	Alcohol
3327.38	O-H tensión	Alcohol
3311.69	O-H tensión	Alcohol
3299.92	O-H tensión	Alcohol
3286.19	O-H tensión	Alcohol
3280.30	O-H tensión	Alcohol
3270.50	O-H tensión	Alcohol
3264.61	O-H tensión	Alcohol
3258.73	O-H tensión	Alcohol
3254.81	O-H tensión	Alcohol
3243.04	O-H tensión	Alcohol
2939.03	C-H tensión	Alcano
2927.26	C-H tensión	Alcano
2903.72	C-H tensión	Alcano
2886.07	C-H tensión	Alcano
2874.30	C-H tensión	Alcano
1730.83	C=O tensión	Aldehído
1721.03	C=O tensión	Cetona alifática
1717.10	C=O tensión	Cetona alifática
1691.60	C=O tensión	Ácido conjugado
1646.49	C=C tensión	Alqueno conjugado
1611.19	C=C tensión	Alqueno conjugado
1595.50	C=C tensión	Alqueno cíclico
1589.61	C=C tensión	Alqueno cíclico

1558.23	C=C tensión	Alqueno cíclico
1418.98	O-H tensión	Alcohol
1415.05	O-H tensión	Alcohol
1371.90	O-H flexión	Fenol
1358.17	O-H flexión	Fenol
1338.56	O-H flexión	Fenol
1256.18	C=Cl tensión	Compuesto halo
1252.26	C-Br tensión	Compuesto halo
1246.38	O-H flexión	Compuesto halo
1230.69	C-N tensión	Amina
1144.39	C-N tensión	Amina
1097.31	C-N tensión	Amina
1052.20	C-O tensión	Alcohol primario
893.33	C=C flexión	Alqueno
816.84	C=C tensión	Alqueno

C3. Picos de espectro de FT-IR en tomate en secado VR sin cabina.

λ	Tipo de pico	Compuesto
3348.95	O-H tensión	Alcohol
3343.07	O-H tensión	Alcohol
3331.30	O-H tensión	Alcohol
3309.72	O-H tensión	Alcohol
3303.84	O-H tensión	Alcohol
3292.07	O-H tensión	Alcohol
3276.07	O-H tensión	Alcohol
3260.69	O-N tensión	Amina
3248.92	O-H tensión	Amina alifática
2986.10	O-H tensión	Ácido carboxílico
2954.72	O-H tensión	Ácido carboxílico
2937.07	O-H tensión	Ácido carboxílico
2933.14	O-H tensión	Ácido carboxílico
2927.26	O-H tensión	Ácido carboxílico
2915.49	O-H tensión	Ácido carboxílico
2901.76	O-H tensión	Ácido carboxílico
2348.66	O-H flexión	Ácido carboxílico
2327.08	O-H flexión	Ácido carboxílico
1773.98	C-O tensión	Compuestos aromáticos
1738.68	C-O tensión	Compuesto aromático
1728.87	C-O tensión	Compuesto aromático
1713.18	C-O tensión	Compuesto aromático
1701.41	C-O tensión	Éster aromático
1648.46	C=C tensión	Alqueno conjugado
1619.03	C=C tensión	Alqueno conjugado

1579.81	C-O tensión	Alcohol secundario
1564.12	C-O tensión	Alcohol secundario
1542.54	C-O tensión	Alcohol primario
1507.24	C=Cl tensión	Compuesto halo
1489.59	C=Cl tensión	Compuesto halo
1460.16	C=Cl tensión	Compuesto halo
1417.02	C=Cl tensión	Compuesto halo
1371.90	O-H flexión	Compuesto halo
1342.48	C-N tensión	Amina aromática
1318.95	C-N tensión	Amina aromática
1260.11	C-O tensión	Éster aromático
820.76	C=Cl tensión	Compuesto halo
779.57	C=Cl tensión	Compuesto halo
671.70	C=Cl tensión	Compuesto halo
657.97	C=Cl tensión	Compuesto halo
650.12	C=Cl tensión	Compuesto halo
634.43	C=Cl tensión	Compuesto halo

Apéndice D

D1. Datos estadísticos obtenidos del secado de charolas en mesocarpio de sandía.

Modelo	Espesor	T (°C)	Constante		R ²	X ²	RMSE
Lewis	3	70	k= 0.01373		0.918284	0.9933	0.07723
		60	k=0.01358		0.871488	0.9999	0.07723
		50	k= 0.00925		0.963591	0.9999	0.07728
	5	70	k= 0.00925		0.802080	0.9999	0.24926
		60	k= 0.01252		0.913880	1.0000	0.25581
		50	k= 0.01252		0.913880	1.0000	0.25581
	7	70	k= 0.03049		0.754194	0.9999	0.25925
		60	k= 0.02239		0.810189	0.9999	0.45212
		50	k= 0.01108		0.796843	1.0000	0.44677
Page	3	70	k= 0.00964	n= 1.07962	0.918280	0.9999	0.07085
		60	k= 0.01223	n= 1.02319	0.911317	0.9999	0.07190
		50	k= 0.00324	n= 1.23516	0.978531	1.0000	0.07687
	5	70	k= 0.00493	n= 1.18089	0.882080	1.0000	0.04558
		60	k= 0.00575	n= 1.09875	0.893941	1.0000	0.06786
		50	k= 0.00831	n= 1.01093	0.858591	1.0000	0.02913
	7	70	k= 0.03999	n= 0.82523	0.754194	1.0000	0.03279
		60	k= 0.02535	n= 0.88465	0.810188	0.9999	0.06069
		50	k=0.02928	n= 0.75914	0.796843	1.0000	0.04897
Weibull	3	70	a= 67.4816	b= 0.9877	0.878543	0.9999	0.00898
		60	a=67.6515	b= 0.9496	0.873658	0.9999	0.00943
		50	a=103.392	b= 1.2351	0.940422	1.0000	0.00591
	5	70	a= 84.2448	b= 1.1859	0.893671	1.0000	0.04459
		60	a= 102.651	b= 1.0837	0.894026	1.0000	0.05676
		50	a= 108.242	b= 0.9593	0.858588	1.0000	0.05655
	7	70	a= 46.7063	b= 0.7968	0.754205	1.0000	0.05305
		60	a= 60.6923	b=0.8537	0.810168	0.9999	0.07131
		50	a= 97.6043	b=0.7251	0.796802	1.0000	0.06839

D2. Datos estadísticos obtenidos del secado de ventana de refractancia en mesocarpio de sandía.

Modelo	Espesor	T (°C)	Constante		R ²	X ²	RMSE
Lewis (sin cabina)	3	85	k=0.10379		0.868041	0.9985	0.80030
		75	k=0.05705		0.833971	0.9999	0.52310
		65	k= 0.05623		0.838683	0.9999	0.51107
	5	85	k= 0.08212		0.623644	0.9187	0.82554
		75	k= 0.04661		0.637700	0.9869	0.68207
		65	k= 0.02072		0.704417	0.9999	0.58142
	7	85	k= 0.05478		0.715505	0.9998	0.63815
		75	k= 0.02036		0.927423	0.9999	0.23604
		65	k= 0.03232		0.651130	0.9999	0.10507
Lewis (con cabina)	3	85	k= 0.10021		0.755130	0.7546	0.05428
		75	k= 0.04822		0.757775	0.9938	0.05602
		65	k= 0.03147		0.644054	0.9953	0.10228
	5	85	k= 0.05006		0.553592	0.4121	0.09197
		75	k= 0.04139		0.491414	0.0118	0.10759
		65	k= 0.01915		0.711179	0.9999	0.07361
	7	85	k= 0.04600		0.576026	0.7416	0.08786
		75	k= 0.03133		0.545666	0.7552	0.12166
		65	k= 0.02049		0.572919	0.9996	0.08038
Page (sin cabina)	3	85	k= 0.06513	n= 0.95366	0.868014	0.9991	0.00059
		75	k= 0.01247	n= 1.20327	0.833497	0.9998	0.03086
		65	k= 0.01160	n= 1.21546	0.838683	0.9998	0.03395
	5	85	k= 0.28944	n= 0.52807	0.623644	0.9999	0.00663
		75	k= 0.16403	n= 0.56013	0.063792	1.0000	0.00812
		65	k= 0.20754	n= 0.40154	0.393887	1.0000	0.39389
	7	85	k= 0.06358	n= 0.81235	0.715505	0.9999	0.00947
		75	k= 0.16403	n= 0.56013	0.637923	0.9999	0.00811
		65	k= 0.12327	n= 0.58244	0.651130	1.0000	0.02688
Page (con cabina)	3	85	k= 2.45003	n= 0.06761	0.755130	0.9992	0.03950
		75	k= 0.07805	n= 0.86426	0.757775	0.9985	0.05392
		65	k= 0.11554	n= 0.66084	0.644054	0.9999	0.04324
	5	85	k= 0.26811	n= 0.53071	0.553592	0.9999	0.05718
		75	k= 0.19700	n= 0.65737	0.491414	0.9999	0.08048
		65	k= 0.01849	n= 1.00839	0.711179	0.9999	0.07355
	7	85	k= 0.16773	n= 0.63979	0.576026	0.9995	0.07387
		75	k= 0.14015	n= 0.60989	0.545666	0.9999	0.05564
		65	k= 0.02119	n= 0.991	0.572919	0.9997	0.0803
Weibull (sin cabina)	3	85	a= -	b= -	-	-	-
		75	a= 38.9569	b=0.6391	0.718685	0.9960	0.26273
		65	a= 36.2975	b=1.1048	0.748723	0.9994	0.06363

Weibull (con cabina)	5	85	a= 9.90254	b= 0.5136	0.624008	0.9999	0.03347
		75	a= 23.3706	b= 0.5458	0.637686	1.0000	0.04393
		65	a= 51.6084	b= 0.5883	0.705218	1.0000	0.06604
	7	85	a= 28.5935	b= 0.5136	0.715482	0.9999	0.03267
		75	a= 73.0374	b= 0.1174	0.927436	0.9999	0.07434
		65	a= 33.8239	b= 0.5658	0.651108	1.0000	0.04906
	3	85	a= -	b= -	-	-	-
		75	a= 19.1228	b= 0.1174	0.644054	0.9999	0.04324
		65	a= 26.4754	b= 0.6757	0.697855	0.9999	0.04121
	5	85	a= 11.9463	b= 0.5307	0.553592	0.9999	0.06718
		75	a= 16.9732	b= 0.5737	0.491414	0.9999	0.08048
		65	a= 52.2768	b= 0.9843	0.659045	0.9999	0.09007
	7	85	a= 16.2898	b= 0.6398	0.576025	0.9998	0.07388
		75	a= 25.5752	b= 0.6303	0.590150	0.9999	0.04972
		65	a= 48.6988	b= 0.9918	0.572919	0.9997	0.08034

D3. Datos estadísticos obtenidos del secado de charolas en tomate.							
Modelo	Espesor	T (°C)	Constante		R ²	X ²	RMSE
Lewis	3	70	k= 0.01924		0.883063	0.9999	0.07239
		60	k=0.01611		0.891576	0.9999	0.09266
		50	k= 0.01639		0.888838	0.9999	0.11253
	5	70	k= 0.01341		0.893908	1.0000	0.05699
		60	k= 0.01012		0.878909	1.0000	0.08201
		50	k= 0.00809		0.904229	1.0000	0.15185
	7	70	k= 0.01407		0.914999	0.9999	0.06129
		60	k= 0.01065		0.927277	1.0000	0.07666
		50	k= 0.00701		0.885725	1.0000	0.10408
Page	3	70	k= 0.01062	n= 1.14369	0.883063	0.9999	0.05640
		60	k= 0.00780	n= 1.16767	0.891576	0.9999	0.07112
		50	k= 0.00583	n= 1.23982	0.888838	0.9999	0.07702
	5	70	k= 0.01257	n= 0.96631	0.893909	1.0000	0.05625
		60	k= 0.01417	n= 0.92971	0.878926	1.0000	0.07336
		50	k= 0.02151	n= 0.80371	0.904229	1.0000	0.09828
	7	70	k= 0.01364	n= 1.00747	0.885562	0.9999	0.06195
		60	k= 0.00621	n= 1.12488	0.910932	1.0000	0.13814
		50	k=0.01261	n= 0.88572	0.885705	1.0000	0.07307
Weibull	3	70	a= 53.1946	b=0.1674	0.883063	0.9999	0.05640
		60	a= 63.8389	b=0.1678	0.891426	0.9999	0.07079
		50	a=63.3931	b=1.2398	0.888838	0.9999	0.07702
	5	70	a= 73.9814	b=0.9692	0.894546	1.0000	0.05613
		60	a= 97.3029	b=0.9297	0.878909	1.0000	0.07331
		50	a= 118.731	b=0.8038	0.904229	1.0000	0.09828
	7	70	a= 70.9949	b=0.9692	0.885562	0.9999	0.06195
		60	a= 94.4203	b=1.0392	0.927276	1.0000	0.07453
		50	a= 139.341	b=0.8857	0.885704	1.0000	0.07307
	3	70	a= 53.1946	b=0.1674	0.883063	0.9999	0.05640
		60	a= 63.8389	b=0.1678	0.891426	0.9999	0.07079
		50	a=63.3931	b=1.2398	0.888838	0.9999	0.07702

D4. Datos estadísticos obtenidos del secado de ventana de refractancia en tomate.

Modelo	Espesor	T (°C)	Constante		R ²	X ²	RMSE
Lewis (sin cabina)	3	85	k=0.05104		0.903694	0.9914	0.03563
		75	k=0.04665		0.917432	0.9939	0.05419
		65	k= 0.02533		0.868761	0.9999	0.05381
	5	85	k= 0.05465		0.542451	0.1917	0.10083
		75	k= 0.02324		0.725741	0.9995	0.13567
		65	k= 0.01373		0.759237	0.7872	0.19488
	7	85	k= 0.05476		0.613019	0.9999	0.09366
		75	k= 0.02243		0.836301	0.9999	0.07257
		65	k= 0.01367		0.755778	0.9999	0.20642
	3	85	k= 0.02846		0.642273	0.9857	0.14252
		75	k= 0.02477		0.625288	0.9979	0.15521
		65	k= 0.01987		0.672463	0.9999	0.11983
Lewis (con cabina)	5	85	k= 0.01277		0.848018	0.9999	0.13391
		75	k= 0.01259		0.738202	0.9999	0.19335
		65	k= 0.01102		0.747785	0.9999	0.13220
	7	85	k= 0.01088		0.850838	0.9999	0.21577
		75	k= 0.01195		0.764766	1.0000	0.09225
		65	k= 0.00717		0.831574	1.0000	0.16541
	3	85	k= 0.01224	n= 1.40925	0.903694	0.9998	0.01931
		75	k= 0.01631	n= 1.29864	0.917432	0.9993	0.03600
		65	k= 0.02560	n= 0.99728	0.868761	0.9999	0.05381
	5	85	k= 0.45258	n= 0.40609	0.542451	0.9999	0.00419
		75	k= 0.09109	n= 0.66149	0.725741	0.9999	0.06059
		65	k= 0.06912	n= 0.66338	0.759237	1.0000	0.06732
Page (sin cabina)	7	85	k= 0.40664	n= 0.43574	0.613019	0.9999	0.04622
		75	k= 0.01437	n= 1.11041	0.836302	0.9999	0.06521
		65	k= 0.06912	n= 0.64581	0.755778	1.0000	0.07167
	3	85	k= 0.00262	n= 1.64518	0.581115	0.6858	0.12284
		75	k= 0.00387	n= 1.48967	0.625289	0.7952	0.13456
		65	k= 0.01166	n= 1.10737	0.709555	0.9967	0.11517
Page (con cabina)	5	85	k= 0.00452	n= 1.23024	0.848018	0.9715	0.09903
		75	k= 0.00210	n= 1.40138	0.738203	0.9999	0.13859
		65	k= 0.00492	n= 1.17206	0.748898	0.9999	0.11205
	7	85	k= 0.01107	n= 1.50131	0.850838	0.9998	0.01245
		75	k= 0.00996	n= 1.03903	0.762279	0.9999	0.09469
		65	k= 0.00234	n= 1.21998	0.832263	0.9997	0.11572

Weibull (sin cabina)	3	85	a= -	b= -	-	-	-
		75	a= -	b= -	-	-	-
		65	a= 34.3502	b=0.9973	0.868761	0.9999	0.05381
	5	85	a= 7.04409	b= 0.4061	0.542451	0.9999	0.04199
		75	a= 36.8774	b= 0.6615	0.725741	0.9999	0.06059
		65	a= 63.3625	b= 0.6645	0.761566	1.0000	0.06863
	7	85	a= -	b= -	-	-	-
		75	a= 45.6296	b= 1.1104	0.836302	0.9999	0.06521
		65	a= 62.6299	b= 0.6458	0.755777	1.0000	0.07167
Weibull (con cabina)	3	85	a= -	b= -	-	-	-
		75	a= -	b= -	-	-	-
		65	a= 51.0551	b= 1.0899	0.62423	0.9835	0.12872
	5	85	a= 80.4925	b= 1.2306	0.848025	0.9999	0.09899
		75	a= 81.3327	b= 1.4013	0.738203	0.9802	0.13859
		65	a= 92.6603	b= 1.1609	0.747785	0.9999	0.11197
	7	85	a= 95.3434	b= 1.5013	0.850838	0.9999	0.11159
		75	a= 84.3478	b= 1.0459	0.764766	0.9999	0.09099
		65	a= 143.313	b= 1.2199	0.832263	1.0000	0.11572

Referencias Bibliográficas

Abidi, N. 2022. FTIR Microspectroscopy: Selected Emerging Applications. Springer International Publishing. Suiza. ISBN: 978-3-030-84424-0

Acosta-Pech, I. y Castillo-Téllez, M. 2022. Modelado matemático del proceso de secado de soya con tecnologías solares en climas cálidos-húmedos. Ingeniería-Tevista de la Facultad de Ingeniería. **26**(2):15-30. ISSN: 2448-8364

Asemani, M. y Reza-Rabbani, A. 2020. Detailed FTIR spectroscopy characterization of crude oil extracted asphaltenes: Curve resolve of overlapping bands. Journal of Petroleum Science and Engineering. **185**. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106618>

Augustia, V., Oktaviani, I., Setyati, W. 2020. Anthocyanin and Flavonoid Extracted from Watermelon Rind (*Citrullus lanatus*) with Two Different Colors of Watermelon Flesh: Yellow and Red. Materials Science Forum. **998**: 261-265. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.261>

Azeez, L., Adebsi, S., Oyediji, A., Adetoro, R. y Tijani, K. 2021. Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. **18** (2): 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.00>

Babu, A., Kumaresan, G, Antony, V. y Velraj, R. 2018. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **90**(1): 536-556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.u04.002>

Badui, S. 2006. Química de los alimentos. 4ª edición. Pearson Educación de México. México.

Bichi, S., Abdulmumin, Y., Abdulmumin, T., Muhammad T., Muhammad, I., Murtala, M., Dalhatu, M., Amina, L., Sarki, S., Danjaji, H. y Mustapha R. 2022. CG-MS and FTIR Analysis of Aqueous Extract of *Citrillus lanatus* (Watermelon) Rind. Scholars International Journal of Biochemistry., **5**(4): 57-66. 10.36348/sijb.2022.v05i04.001

Cambuy-Siqueira, V., Acácio-Mabasso, G., Darci-Quequeto, W., Ramos da Silva, C., Siqueira-Martins, E., Pedroza-Isquierdo, E. 2020. Drying kinetics and effective

diffusion of Watermelon seeds. Research, Society and Development. 9(4):1-17. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2887>

Castillo-Téllez, B., Mejía-Pérez, G., Castillo-Téllez, M., Gutiérrez-Villegas, J. y Quiroz-Martínez, R. 2020. Mathematical Modeling of Oregan Leaf Drying (*Plectranthus amboinicus*) using direct and indirect technologies. Revista de Tecnologías en Procesos Industriales. **4** (10):27-36.

Castro Acosta, M. 2021. Polifenoles: Compuestos bioactivos con efectos benéficos en la prevención de diabetes tipo 2. Revista digital RED CieN. **1** (3):13-18. <http://www.redcien.com/index.php/redcien/article/view/5>

Castro Arata, D., Otero Nole, K., Llamoca Domínguez, E. 2021. Estudio de los parámetros cinéticos en el secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*). Revista de Innovación y Transferencia Productiva. **2**(1):1-11. <https://doi.org/10.54353/ritp.v2i1.e005>

Choi, Y. y Okos, M. R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. In Food Engineering and Process Applications, Vol. 1. "Transport Phenomena." M. Le Maguer and P. Jelen, eds., 93–101. Elsevier Applied Science Publishers, Londres.

Cisneros, L., Salmones, D., Tejero, J. y Cerecero, R. 2019. Retention of β -glucans in *Lentinula edodes* drying by refractance window. Meeting of Food Engineering. **3** (3): 23-27. ISSN 2617-3387 IFBRESCHNSASTSAC.

Cortés, R. González, E. Concepción, D., Miño, J. 2020. Métodos matemáticos en la estrategia de procesos para la solución de problemas en la industria química. Capítulo 1. Las herramientas matemáticas en la búsqueda de las condiciones óptimas: un intangible para la intensificación de procesos químicos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Misiones. Argentina.

Darvishi, H., Mohammadi, P., Azadbakht, M., y Farhudi, Z. 2018. Effect of Different Drying Conditions on the Mass Transfer Characteristics of Kiwi Slices. Journal of Agricultural Science and Technology. **20** (2): 249-264.

Dermesonlouoglou, E., Pantelaiaki, K., Andreou, V., Katsaros, G. y Taoukis, P. (2019). Osmotic pretreatment for the production of novel dehydrated tomatoes and cucumbers. Journal of Food Processing and Preservation. e13968. DOI: 10.1111/jfpp.13968

Dirección General de Normas. 1986. NMX-F-083-1986. Alimentos. Determinación de humedad en productos alimenticios. México: Diario Oficial de la Federación.

Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O. y Boumahdi, M. 2019. A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer. *Solar Energy*. 193: 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.057>

Dubey, S., Rajput, H. y Batta, K. 2022. Utilization of Watermelon Rind (*Citrullus lanatus*) in Various Food Preparations: A Review. *Chemical Science Review and Letters*. **11**(41): 77-82. DOI:10.37273/chesci.cs205205361

Elavaransan, E., Kumar, Y., Mouresh, R. y Kumar-Natarajan, S. 2021. Study of Drying Kinetics of Tomato in a Solar Dryer. *Current Advances in Mechanical Engineering*. 349-358. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_33

Elías, F., Ocaña, A. y Ortiz, I. 2020. Modelado del proceso de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de frutas. Tesis de licenciatura. Universidad de Piura. Perú.

Engín, A. y Kuşçu, A. 2023. The effect of different drying processes on some nutritional and quality criteria in tomato powder. *Journal of Gaziosmanpasa Scientific Research*. **12** (1): 194-204. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gbad/issue/77433/1229460>

Espinoza-Ramírez, Y. 2023. Microencapsulados de licopeno y compuestos fenólicos a partir de extractos de jitomate Cherry (*Solanum lycopersicum* var. cerasiforme). Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de la Mixteca. México.

FAO. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo 90. Dirección de Producción y Protección Vegetal. Roma. ISBN 92-5-302719-3

Fogler, H.S. 2008. Elementos de Ingeniería Química de las Reacciones Químicas. Pearson Educación. México. ISBN: 978-970-1198-1

Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L. y Andersen, L. 2006. Principios de Operaciones Unitarias. Segunda Edición. Editorial Continental. México.

González, L., Arroyo, A., Tobar, A., Polanía, A., Ayala, A., Díaz, A., 2021. Obtención de “Snacks” de piña (*Ananas comosus*) mediante las técnicas combinadas de Ventana de Refractancia y Fritura con Aire Caliente. *Revista*

Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. **20** (1): 165-178.
<https://doi.org/10.18684/rbsaa.v19.n2.2021.1879>

Guan, X., Lin, B., Xu, Y., Bai, S., Li, R. Wang, S. 2021. Thermal inactivation kinetics for *Acidovorax citrulli* on watermelon seeds as influenced by seed component, temperature, and water activity. Biosystems Engineering. **210**: 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.08.029>

Guemouni, S., Mouhoubi, K., Brahmi, F., Dahmoune, F., Belhabib, A., Benyoub, C., Adjeroud-Abdellatif, N., Atmani, K., Bakhouch, H., Boulekbache-Makhlouf, L., Madani, K. 2022. Convective and microwave drying kinetics and modeling of tomato slices, energy consumption, and efficiency. Journal of Food Process Engineering. **45** (3). 1-12. DOI:10.1111/jfpe.14113

Guerrero-Perez, M. y Patience, G. 2019. Experimental methods in chemical engineering: Fourier transform infrared spectroscopy-FTIR. The Canadian Journal of Chemical Engineering. (98): 25-33. doi:10.1002/cjce.23664

Gyimah, L., Amoatey, H., Boatin, R., Appiah, V. y Odai, B. 2020. The impact of gamma irradiation and storage on the physicochemical properties of tomato fruits in Ghana. Food Quality and Safety. **4** (3): 151-157.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa017>

Hasan-Masud, M., Karim, A., Ashrabi-Ananno, A. y Ahmed, A. 2020. Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges. Springer International Publishing. Bangladesh. ISBN: 9783030424763

Huanativo-Suarez, E., Oque-Paccotico, R., Pacheco-Mamani, J., Charca-Colque, J., Aycaya-Mamanchura, M., Chiara-Mamani, L. y Calapuja-Ayamamani, C. 2021. Propiedades físicas y químicas del Tomate de Arbol (*Solanum betaceum*) durante el almacenamiento. Revista de Investigación Científica. **3** (2):45-52

Hossain, M., Mitra, S., Belal, M. y Zaman, W. 2021. Effect of foamig agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. Food Research. **5** (1): 291-297.
[https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(1\).372](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(1).372)

Hoque, M. y Iqbal, A. 2015. Drying of Watermelon Rind and Development of Cakes from Rind Powder. International Journal of Novel Research in Life Sciences. **2** (1): 14-21.

Ibarz, A. y Babosa-Cánovas, G. 2002. Unit operations in food engineering. CRC Press LLC. USA. ISBN 1-56676-929-9.

Ilahy, R., Tlili, I., Wasim-Siddiqui, M., Hdider, C., Salvatore-Lenucci, M. 2019. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and Watermelon fruits. *Fruits. Front. Plant Sci.* **10**: 796 1-16 <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00769>

Infoagronomo. 2019. Morfología y partes de los frutos. <https://infoagronomo.net/> (consultada en abril, 2022)

Inoue, T., Yoshida, K, Sasaki, E., Aizawa, K. & Kamioka, H. 2021. Effects of lycopene intake on HDL-cholesterol and triglyceride levels: A systematic review with meta-analysis. *Journal of Food Science.* **86** (8): 3285-3302. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15833>

Isa, J., Olalusi, P. y Omoba, S. 2021. Drying Characteristics of foam dried watermelon as affected by stabilizing agent and drying air temperature. *Annals. Food Science and Technology.* **22** (3): 285-299. ISSN 2065-2828

Jafari S. y Malekjani N. 2023. Drying Technology in Food Processing: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. *Elvesier Science.* United Kingdom. ISBN: 978-0-12-819895-7

Jahanbakhshi, A., Sharabiani, V., Heidarbeigi, K., Kaveh, M., Taghinezhad, E. (2019). Evaluation of engineering proprieties for waste control of tomato during harvesting and postharvesting. *Food Science & Nutrition.* **7** (4):1145-1552. <https://doi.org/10.1002/fsn3.986>

Jin, N., Jin, L., Wang S., Meng, X., Ma, X., He, X., Zhang, G., Luo, S., Lyu, J. y Yu, J. 2022. A Comprehensive Evaluation of Effects on Water-Level Deficits on Tomato Polyphenol Composition, Nutritional Quality and Antioxidant Capacity. *Antioxidants.* **11** (8): 1585-1590. <https://doi.org/10.3390/antiox11081585>

Kainat, S., Rubina-Gilani, S., Asad, F., Zubair-Khalid, M., Khalid, W., Rahjha, M., Bangar, S., Lorenzo, J. 2022. Determination and Comparison of Phytochemicals, Phenolics and Flavonoids in *Solanum lycopersicum* Using FTIR Spectroscopy. *Food Analytical Methods.* **15** (2). DOI:10.1007/s12161-022-02344-w

Khan, S.A., Khan, S.B., Khan, L.U., Farooq, A., Akhtar, K., Asiri, A. 2018. Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization. In Sharma, S. (eds) Handbook of Materials Characterization. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_9

Kipcak, A. y Doymaz, I. 2020. Microwave and Infrared drying kinetics and energy consumption of Cherry Tomatoes. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 26(2): 203-212. <https://doi.org/10.2298/CICEQ190916039K>

Kistriyani L., Alvi-Ramadhani, A. y Puji-Resphaty, D. 2019. Encapsulation of Anthocyanin and Flavonoid from Watermelon Rind (*Citrullus lanatus*) as a Natural Food Preservative. Key Engineering Materials **818**: 50-55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.818.50

Kumar, N., Kumar, S., Sudhakar, A., Kumar, D., Shankar, S., Thakur, M., Singh, S., Tripathy, S., Kumar, A. y Prakash, P. 2021. Refractance Window TM- Drying vs other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments. Future Foods. **3**(1): 2-23. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>

Kumar-Patle, T., Shrivastava, K., Kurrey, R., Upadhy, S., Jamgde, R., Chauhan, R. (2020). Phytochemical screening and determination of phenolics and flavonoids in *Dillenia pentagyna* using UV-vis and FT-IR spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. **242**. 118717. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118717>

Lakshmipathy, R. y Sarada, N. 2015. Methylene blue adsorption onto native watermelon rind: batch and fixed bed column studies. Desalination and Water Treatment. 57(23):10632-10645. doi: 10.1080/19443994.2015.1040462

Leite, F., Queiroz, M., Figueiredo, R., Santos, F., Silva, F., Santos, D. 2022. Mathematical modeling and thermodynamic properties in the drying of citron watermelon seeds. Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering. **26**(1):67-74. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n1p67-74>

Liu, X., Cheng, R., Xu, B., Bai, T., Xu, W., Zhang, C., Luo, D., Zhao, J., Zhang, X., Sun, Y. 2022. Application of SNP markers based on KASP technology in fingerprint construction and seed purity detection of watermelon varieties. Jiangsu

Journal of Agricultural Sciences. **38** (5): 1348-1356. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.05.022

López-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P.J., Norton, I.T., Bakalís, S. 2019. A model-based study of rehydration kinetics in freeze-dried tomatoes. *Energy Procedia*. **161**: 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.060>

López-Sánchez, A., Luque-Badillo, A., Orozco-Nunnelly, D., Alencastro-Larios, N., Ruiz-Gómez, J., García-Cayuela, T., Gradilla-Hernández, M. 2021. Food loss in the agricultural sector of a developing country: Transitioning to a more sustainable approach. The case of Jalisco, Mexico. *Environmental Challenges*. **5**: 1-16 <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100327>

López-Vidaña, E., César-Munguía, A., García-Valladares, Octavio, Pilatowsky Figueroa, I. Brito-Orosco, R. 2020. Thermal performance of a passive, mixed-type dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*. **147**: 845-855. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018>

Mamade Toure, B., González Suárez, E., Curbelo Sánchez, A., Peralta Suárez, L. y Miño Valdés, J. 2017. Herramientas de investigación para incrementar el impacto de la ciencia en la industria química. *Revista Científica de la UCSA*. **4** (2): 67-77. 10.18004/ucsa/2409-8752/2017.004(02)067-077

Manresa González, A. y Vicente, I. 2007. El color en la industria de los alimentos. Ciudad de La Habana: Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-0582-5

Martínez, J.R., Espericueta, D., Guerrero-Serrano, G., Ortega-Zarzosa, G., Espericueta, E. y Lobo-Guerrero, A. 2020. Stabilization of β -carotene embedded in a silica matrix and study of its physical properties. *Materials Research Express*. **7**. (1): 1-11. DOI 10.1088/2053-1591/ab6808

Mata-Miranda, M., Guerrero-Robles, C., Rojas-López, M., Delgado-Macuil, R., González-Díaz, C., Sánchez-Monroy, V., Pérez-Ishiwara, D. y Vázquez-Zapén, G. 2017. Componentes Principales mediante Espectroscopia FTIR como Técnica de Caracterización Innovadora durante la Diferenciación de Células Madre Pluripotentes a Células Pancreáticas. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, **38** (1): 225-234. <https://doi.org/10.17488/rmib.38.1.17>

Misha, S., Mat, S., Ruslan, M. y Bin, K. 2013. Review on the Application of a Tray Dryer System for Agricultural Products. *World Applied Sciences Journal* **22** (3): 424-433. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.03.343

Montanuci, F., De Matos-Jorge, L. y Matos-Jorge, R. 2013. Kinetic, thermodynamic properties and optimization of barley hydration. *Food Science Technology*. **33** (4): 690-698. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612013000400014>

Montgomery, D. 2004. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Segunda Edición. Editorial Limusa. México. ISBN 968-18-6156-6

Mujumdar, A., Lim, C. 2010. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food Bioprocess Technol* **3**(1): 843-852. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>

Nasir, H., Allai, F., Gull, A., Ahmad-Ganaie, T., Azad, Z. 2020. Effect of pre-treatments on desirable qualities attributes of watermelon rind based candy. *Journal of Postharvest Technology*. **08** (1): 38-52. ISSN: 2348-4330

Nindo, C. y Tang, J. 2007. Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology* **25**(1): 37-48. doi: 10.1080/07373930601152673

Nonhebel, G. y Moss, A. 2002. *El secado de sólidos en la industria química*. Editorial Reverté. Barcelona.

Ochoa-Martínez, C., Quintero, P., Ayala, A. y Ortiz, M. 2012. Drying characteristics of mango slices using the Refractance WindowTM technique. *Journal of Food Engineering*. **109** (1): 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032>

Ocoro M. y Ayala A. 2012. Evaluación de la técnica de ventana de refractancia en el secado de puré de papaya (*Carica Papaya L.*). *Vitae*, I **19** (1): S72-S74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169823914016>

Ochida, C., Itodo, A., Anhwange, B., Nwanganga, P. y Abah, C. 2019. Chemical and microbial quality evaluation of Fresh tomato and its processed products using FTIR, SEM and GC-MS. *Journal of Postharvest Technology*. **07** (3): 30-44. ISSN: 2348-4330.

Oluwadara, O.C. 2019. Drying characteristics of watermelon waste. Tesis de Doctorado. Ladoke Akintola University of Technology. Nigeria.

Ortiz, M. 2014. Modelación matemática del secado de alimentos por el método de ventana de refractancia. Tesis de Doctorado. Universidad del Valle. Colombia.

Otręba, M., Kośmider, L., Stojko, J. y Rzepecka-Stojko, A. 2020. Cardioprotective Activity of Selected Polyphenols Based on Epithelial and Aortic Cell Lines. A Review. *Molecules*. **25** (22), 5343. <https://doi.org/10.3390/molecules25225343>

Oyinloye, T.M. y Yoon, W.B. 2020. Effect of Freeze-Drying on Quality and Gridding Process of Food Produce: A Review. *Processes*. **8** (3): 1-23 <https://doi.org/10.3390/pr8030354>

Padilla-Gómez, M. y Suárez-Hernández, J. 2021. Evaluación del contenido de humedad y cambios de color en el ají dulce (*Capsicum annum*) durante el secado por ventana refractiva. Tesis de Licenciatura. Universidad de Córdoba. Colombia.

Parsons, R. 2005. Fundamentals: 2005 ASHRAE Handbook: Inch-Pound Edition. Amer Society of Heating. USA.

Portela, J., Pessoa, T., Pereira-Lima, J., El-Aouar, A. 2015. Evaluation mass transfer during the drying of watermelon rind to obtain and characterize its flour. *Revista de Ciencia y Tecnología*. 17 (23): 18-24. ISSN 1851-7587

Rajoriya, D., Bhavya, M. L., y Umesh Hebbar H. 2021. Impact of process parameters on drying behaviour, mass transfer and quality profile of refractance window dried banana puree. *LWT*, **145** (1): 2-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111330>

Ramarao, K., Razali, Z. y Somasundram, C. 2021. Mathematical models to describe the drying process of *Moringa oleifera* leaves in a convective-air dryer. *Czech Journal of Food Sciences*. **39** (6); 444-451. DOI: 10.17221/257/2020-CJFS

SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2021. Creció producción y exportación de sandía mexicana en 2020. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/> (consultada en abril, 2022)

SAGARPA (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017 - 2030. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/> (consultada en mayo, 2022)

Sahoo, M., Titikshya, S., Kumar, M., Kumar, V. y Naik, S. 2022. Effect of Convective Drying on Texture, Rehydration, Microstructure a Behavior of Yam (*Dioscorea pentaphylla*) Slices. Journal of Scientific & Industrial Research. **81** (9): 995-1009. DOI: 10.56042/jsir.v81i09.64040

Santes, A., Villaseñor, Y., Tejero, J. y Cerecero, R. 2019. Retention of phenolic compounds in slices of watermelon dried by refractance window. Meeting of Food Engineering. **3**(3): 28-32.

Santos, V., Souza, R., Tavares, R. y Sanchez, O. 2022. A review on refractance window drying process of fruits and vegetables: its integration with renewable energies. Journal Food Technology, **25**: 1-14. doi: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.15321>

Sarkar, T., Saha, S., Salauddin, M. y Chakraborty, R. 2021. Drying kinetics, Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Analysis and Sensory Evaluation of Sun, Hot-air, Microwave and Freeze Dried Mango Leather. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences. **10** (5). <https://doi.org/10.15414/jmbfs.3313>

Sarpute, U. 2019. Industrial Process Control (ISC 701): Dryer. VPM's Maharchi Parshuram. College of engineering. https://vpmpmpcoe.org/naac/ICT%20TOOLS/pdf-INSTRU/Dryer_Mr.%20Satpute-converted-compressed.pdf (consultada en noviembre, 2022)

Secretaría de Salud. 2002. PROY-NOM-211-SSA1-2002. Productos y servicios. Métodos de prueba fisicoquímicos. Determinación de humedad y sólidos totales en alimentos por secado en estufa. Determinación de arsénico, cadmio, cobre, cromo, estaño, hierro, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio y zinc en alimentos, agua y hielo aptos para consumo humano, bebidas y aditivos alimentarios por espectrofotometría de absorción atómica. México: Diario Oficial de la Federación.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2022. Escenario mensual de productos agroalimentarios. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/> (consultada en abril, 2022)

Singh, R. y Heldman, D. 2001. Introducción a la Ingeniería de los alimentos. Segunda Edición. Acribia Zaragoza. España. ISBN: 978-84-200-1124-0

Singh, R. y Heldman, D. 2006. Introduction to Food Engineering. Fourth Edition. Elsevier. USA. ISBN: 978-0-12-370900-4

Sinthia-Dewi, E., Hakim, A. y Telly-Savalas, L. 2018. Innovation of Lycopene Isolation Procedure from Tomatoes (*Lycopersicum esculentum*). Proceeding of the 2nd Mathematics, Informatics, Science and Educational Conference (MISEIC). 205-210. <https://doi.org/10.31219/osf.io/9nafj>

Starek, A., Pawlat, J., Chudzik, B., Kwiatkowski, M., Terebun, P., Sagan, A. y Andrejko, D. (2019). Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. Science Reports. 9. 8407. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44946-1>

Tahmasebi, M. y Emam-Djomeh, Z. 2021. Lycopene degradation and color characteristics of fresh and processed tomatoes under the different drying methods: a comparative study. Chemical Papers. **75** (7): 3617-3623. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01611-0>

Tigcilema-Toca, C. 2020. Revisión de Literatura: Importancia del licopeno, métodos de extracción y propuesta para la adición de tomate en polvo en jamón Virginia. Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana. Honduras.

Torres A. 2012. Caracterización física, química y compuestos bioactivos de pulpa madura de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) (Cav.) Sendtn. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. **62** (4): 381-388. ISSN 0004-0622

Torres-Niño, M., Carlos-Martínez, S., Pérez-Jose, D., Martínez-Sánchez, C., Carmona-García, R., Rodríguez-Miranda, J. y Herman-Lara, E. 2021. Evaluación del secado por Ventana refractiva RWTM en dos estados físicos del betabel. Avances en Ingeniería Química. **1** (3): 112-116.

USDA (US Department of Agriculture). 2019. Watermelon, raw. Food Data Central. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/> (consultada en febrero, 2023).

Valand, R., Tanna, S., Lawson, G. y Bengtström, L. 2019. A review of Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy used in food adulteration and authenticity investigations. Food Additives & Contaminants: Part A. **37** (1). 19-38. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1675909>

Valle-Vargas, M., Durán-Barón, R., Quintero-Gamero, G. y Valera, R. 2020. Caracterización fisicoquímica, químico proximal, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de pulpa y corteza de sandía (*Citrullus lanatus*). Información Tecnológica. **31**(1): 21-28. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100021>

Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M. y Barbosa-Cánovas, G. 2001. Advances in dehydration of foods. Journal of Food Engineering. **49**: 271-289. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7)

Verma, D.K, Mahato, D.K., Billoria, S. y Srivastav, P. 2018. Effect of Thermal Processing on Nutritional Composition of Green Leafy Vegetables: A Review. Engineering Interventions in Foods and Plants. CRC Apple Academic Press. USA. ISBN: 9781315194677

Verma, D.K. y Srivastav, P. 2020. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: a comprehensive review. Food Research International. **130**:1–33. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108924>

Villalba-Vidales, J. y Arzola-de la Peña, N. 2015. Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa. Ingeniería y Desarrollo. **33** (2): 301-330. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.5674>

Wang, J., Zhu, K., Wang, Y., Dai, B. Liu, S. y Li, Y. 2020. Moisture diffusion and shrinkage characteristics of broad bean during low-temperature vacuum drying. International Journal of Food Properties. **23**. (1). 2217-2230. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1849277>

X-Rite, Inc. 2023. Valores de color/espacios de color de LAB. <https://www.xrite.com/es/blog/lab-color-space> (consultada en octubre 2023)

Zhuang, J., Li, M., Pu, Y., Ragauskas, A. y Geun-Yoo, C. 2020. Observation of Potential Contaminants in Processed Biomass Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Applied Sciences. 10. 4345. doi:10.3390/app10124345

Zotarelli, M., Mattar, B. y Laurindo, J. 2015. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. Food Research International. **69**: 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 27 del mes de noviembre del año 2024.

El(la) que suscribe

C. Karla Yoali Sánchez Andrade

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 121 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada
"MODELACIÓN MATEMÁTICA EN SECADO DE VENTANA DE REFRACTANCIA EN MESOCARPIO DE SANDÍA Y TOMATE"

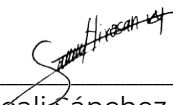
del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, bajo la asesoría y dirección del (la) Dra. Rosalía Cerecero Enríquez y Dr. José Manuel Tejero Andrade y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México/Instituto tecnológico de Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Nombre y firma


Karla Yoali Sánchez Andrade