



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Tesis para obtener el grado de:**

**Doctor en Ingeniería Química**

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE FREÍDO SOBRE LA RETENCIÓN DE  
COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN PRODUCTOS VEGETALES  
PRETRATADOS POR DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA**

**PRESENTA:**

**M.I.Q. Mariana Aguirre García**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Dr. Irving Israel Ruiz López**

**ASESOR DE TESIS:**

**Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco**

**BUAP**

**junio, 2023**



**BUAP**

Oficio: FIQ/SIEP/035/2023

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza  
Director General de Bibliotecas  
Presenta

A través de este medio me dirijo a usted para informarle que la tesis con título: **“Análisis del efecto de freído sobre la retención de compuestos antioxidantes en productos vegetales pretratados por deshidratación osmótica”** ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por lo tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno	Matrícula	Facultad	Posgrado	Programa Educativo
Mariana Aguirre García	219570097	Ingeniería Química	Ingeniería Química	Doctorado en Ingeniería Química

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 22 de junio de 2023

Dra. Esmeralda Vidal Robles  
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrados



Dr. Irving Israel Ruiz López  
Director de Tesis



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre del (de la) estudiante: Mariana Aguirre García  
Matrícula: 219570097  
Nombre del director: Dr. Irving Israel Ruiz López  
Nombre del codirector: Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco

**Título de la Tesis:**

Análisis del efecto de freído sobre la retención de compuestos antioxidantes en productos vegetales pretratados por deshidratación osmótica

**Comisión Revisora:**

Presidente: Dra. Verónica Santacruz Vázquez  
Secretario(a): Dr. Ernesto Chigo Anota  
Vocal (1): Dr. Héctor Ruiz Espinosa  
Vocal (2): Dr. Miguel Ángel García Alvarado  
Vocal (3): Dr. Irving Israel Ruiz López  
Vocal (4): Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco

Firma: \_\_\_\_\_  
Firma: \_\_\_\_\_  
Firma: \_\_\_\_\_  
Firma: \_\_\_\_\_  
Firma: \_\_\_\_\_

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de doctorado que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, hora y lugar que se indican a continuación.**

Fecha: 29 de junio de 2023

Hora: 11:00 horas

Lugar: Salón FIQ8/201 de la Facultad de Ingeniería Química, BUAP.

# Agradecimientos

**A Dios**, por haberme dado salud para lograr mis objetivos y una familia que me apoya en todo momento.

**A mi mamá**, por apoyarme siempre, darme consejos, valores y motivación lo cual me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su ejemplo de paciencia y amor.

**A mi papá**, por guiarme por el buen camino y por todo su apoyo económico para que pudiera recibir la mejor educación.

**A mis hermanos**, por compartir conmigo tanto buenos como malos momentos, me siento muy feliz de tenerlos.

**A mis asesores**, por compartir conmigo su tiempo, conocimiento, experiencia y guía durante todo este proceso.

**A mis compañeras de laboratorio/amigas**, por ayudarme y acompañarme, les aprendí mucho a todas.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por la beca otorgada (CVU-704099) para la realización de mis estudios de doctorado.

# Resumen

En el presente trabajo se estudió el proceso de transferencia de masa durante deshidratación osmótica/impregnación en matrices vegetales (papaya y piña) haciendo uso de soluciones de sacarosa y extracto de Jamaica/sacarosa. En la primera etapa se realizó la caracterización fisicoquímica (pH, SST, ATT, índice de madurez y color), compuestos fenólicos totales (CFT), antocianinas (ANT) y capacidad antioxidante (CAT) de las materias primas. La segunda etapa se enfocó en el proceso de deshidratación osmótica donde se obtuvieron las cinéticas de pérdida de agua y ganancia de sólidos de cubos de papaya con solución de sacarosa (20°Bx; 45-65°C), las cuales se modelaron con un nuevo modelo desarrollado que considera el transporte de masa de agua y solutos acoplados y el encogimiento del producto para su solución. En la tercera etapa se llevó a cabo el proceso de impregnación de compuestos bioactivos en cubos de papaya y secciones de cilindro anular de piña con solución de extracto de Jamaica-sacarosa (SEJS) a 20 y 30°Bx respectivamente a tres temperaturas (45, 55 y 65°C), donde se obtuvieron las cinéticas experimentales de los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante que posteriormente fueron modelados. En la cuarta etapa se evaluó el efecto del freído con aire sobre la retención de bioactivos en papaya y piña previamente impregnada con sacarosa (control) y SEJS. Se demostró que el no considerar la solución de las ecuaciones de transferencia de masa de agua y solutos acoplados en conjunto con el encogimiento del producto para el modelo desarrollado del proceso de DO llevan a una sobreestimación de los coeficientes de difusión hasta un 281 % para agua y 75 % para los sólidos. Por otra parte, el proceso de impregnación con SEJS después de 360 min aumentó los valores de CFT, ANT y CAT en forma significativa

en papaya (670-990 mg GAE/100 g p.f., 48.8-65.0 mg C3G/100 g p.f. y 805-1004 mg TE/100 g p.f.) y en piña (613-838 mg GAE/100 g p.f., 27.5-37.7 mg C3G/100 g p.f. y 1114-1343mg TE/100 g p.f.). En cuanto al proceso de fritura al aire en las muestras impregnadas con SEJS no se observaron diferencias significativas para CFT y ANT en papaya y ANT y CAT en piña.

# Abstract

The mass transfer process during osmotic dehydration/impregnation in vegetable matrices (papaya and pineapple) was studied using solutes like sucrose, as well as others rich in bioactive compounds from roselle calyxes using sucrose and Roselle extract/sucrose solutions. The study is divided in four stages, the first one consists in the physicochemical characterization (pH, TSS, TA, maturity index and color), total phenolic compounds (TPF), anthocyanins (ANT) and antioxidant capacity (CAT) of the raw materials. The second stage focuses on the osmotic dehydration process where the water loss and solids gain kinetics of papaya cubes immersed in sucrose solutions (20°Bx; 45-65°C) were obtained. The experimental data were described by a novel mass transfer model coupling the water and solids transport while also considering the food shrinkage. The third stage deals with the impregnation of bioactive compounds in papaya cubes and pineapple acuts during their immersion in roselle extract/sucrose solutions (RESS) at 20 and 30°Bx (45, 55 and 65°C) respectively, where the experimental kinetics of the bioactive compounds and antioxidant capacity were also modeled. In the fourth stage, the bioactive retention was evaluated during the air frying process of previously impregnated papaya and pineapple with sucrose (control) and RESS. The current findings show that not considering the coupled solution of the ETMs of water and solutes and the shrinkage of the product in the model proposed for the DO process lead to an overestimation of the diffusion coefficients up to 281% for water and 75% for solute. On the other hand, the impregnation process with RESS after 360 min significantly increased the values of CFT, ANT and CAT for papaya (670-990 mg GAE/100 g FW, 48.8-65.0 mg C3G/100 g FW and 805-1004 mg TE/100 g FW)

and for pineapple (613-838 mg GAE/100 g FW, 27.5-37.7 mg C3G/100 g FW and 1114-1343mg TE/100 g FW). Regarding the air frying process of RESS-impregnated samples, no significant differences were observed for TPC and ANT in papaya and ANT and CAT in pineapple.

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>XVIII</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I Antecedentes</b>	<b>2</b>
1.1 Alimentos funcionales . . . . .	2
1.1.1 Probióticos, prebióticos y simbióticos . . . . .	3
1.1.2 Antioxidantes . . . . .	3
1.2 Compuestos bioactivos con capacidad antioxidante . . . . .	4
1.2.1 Compuestos fenólicos . . . . .	4
1.2.2 Flavonoides . . . . .	8
1.2.3 Antocianinas . . . . .	11
1.3 Capacidad antioxidante . . . . .	12
1.4 Alimentos de origen vegetal ricos en compuestos antioxidantes . . . . .	14

1.4.1	Papaya ( <i>Carica papaya</i> L.) . . . . .	15
1.4.2	Piña ( <i>Ananas comosus</i> L.) . . . . .	16
1.4.3	Flor de Jamaica ( <i>Hibiscus Sabdariffa</i> ) . . . . .	19
1.5	Proceso de deshidratación osmótica/impregnación . . . . .	20
1.6	Proceso de freído como proceso posterior a DO/impregnación . . . . .	22
1.6.1	Freído con aire caliente . . . . .	25
1.6.2	Modelos de transferencia de masa . . . . .	26
1.6.2.1	Modelo de difusión . . . . .	27
1.6.2.2	Modelos de superficie de respuesta . . . . .	29
1.6.2.3	Modelo de Azuara . . . . .	30
1.6.2.4	Modelo de Peleg . . . . .	33
1.6.2.5	Modelo de Page . . . . .	34
1.6.2.6	Modelo de Magee . . . . .	35
1.6.3	Incorporación de compuestos antioxidantes a matrices alimenticias	36
1.7	Síntesis de antecedentes . . . . .	41
1.8	Objetivos del trabajo . . . . .	41
1.8.1	Objetivo general . . . . .	41
1.8.2	Objetivos específicos . . . . .	41
<b>II</b>	<b>Metodología</b>	<b>43</b>
2.1	Caracterización fisicoquímica de las materias primas . . . . .	43
2.2	Proceso de deshidratación osmótica . . . . .	43
2.2.1	Procedimiento experimental . . . . .	43
2.2.2	Modelo de deshidratación osmótica desarrollado . . . . .	46
2.2.3	Solución del modelo . . . . .	50
2.2.4	Estimación de los coeficientes de difusión . . . . .	54

2.2.5	Análisis de datos . . . . .	57
2.3	Proceso de impregnación de compuestos bioactivos . . . . .	57
2.3.1	Procedimiento experimental . . . . .	57
2.3.1.1	Materias primas . . . . .	57
2.3.1.2	Preparación de la solución de extracto de Jamaica/sacarosa	59
2.3.1.3	Experimentos de impregnación . . . . .	59
2.3.1.4	Determinación de compuestos bioactivos . . . . .	61
2.3.2	Modelos de impregnación desarrollados . . . . .	63
2.3.2.1	Cubos de papaya . . . . .	63
2.3.2.2	Cuñas de piñas . . . . .	67
2.3.3	Análisis de datos . . . . .	70
2.4	Proceso de freído . . . . .	70
2.4.1	Experimentos de freído en productos impregnados SST . . . . .	70
2.4.2	Determinación de compuestos bioactivos en producto frito . . . . .	71
<b>III</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>73</b>
3.1	Caracterización fisicoquímica de materias primas . . . . .	74
3.2	Proceso de deshidratación osmótica de papaya . . . . .	77
3.2.1	Pérdida de agua y ganancia de solutos . . . . .	77
3.2.2	Características de encogimiento . . . . .	85
3.2.3	Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica . . . . .	89
3.3	Proceso de impregnación de compuestos bioactivos . . . . .	98
3.3.1	Pérdida de agua y ganancia de sólidos en papaya impregnada . . . . .	98
3.3.2	Características de encogimiento de los cubos de papaya impregnados . . . . .	100

3.3.3	Impregnación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en cubos de papaya . . . . .	102
3.3.4	Análisis de transferencia de masa del proceso de impregnación de papaya . . . . .	107
3.3.5	Pérdida de agua y ganancia de sólidos en piña impregnada . . .	111
3.3.6	Características de encogimiento de las secciones de cilindro anular de piña impregnadas . . . . .	113
3.3.7	Impregnación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en secciones de cilindro anular de piña . . . . .	114
3.3.8	Análisis de transferencia de masa del proceso de impregnación de piña . . . . .	118
3.4	Proceso de fritura . . . . .	120
<b>IV</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>124</b>

# Índice de figuras

1.1	Rutas biosintéticas que conducen a la síntesis de los compuestos fenólicos. Adaptado de Morandi et al. (2019). . . . .	5
1.2	Estructuras químicas de compuestos fenólicos comunes. . . . .	6
1.3	Clasificación de los compuestos fenólicos. . . . .	7
1.4	Mecanismo de acción del reactivo de Folin-Ciocalteu. . . . .	8
1.5	Estructura básica de los flavonoides donde (A) y (B) son anillos fenil y (C) es un anillo heterocíclico pirano. . . . .	9
1.6	Clasificación de flavonoides y sus estructuras. . . . .	10
1.7	Ejemplos de estructuras de flavonoles. . . . .	10
1.8	Antocianinas más comunes en flores y frutos (Moreno et al., 2010). . .	11
1.9	Reacción química entre el radical DPPH y la especie antioxidante (Mubarak et al., 2019). . . . .	14
1.10	Planta de papaya ( <i>Carica papaya</i> L.). Fuente: iStockphot.com. . . . .	15
1.11	Planta de piña ( <i>Ananas comosus</i> L.) con fruto. Fuente: iStockphot.com. . . . .	17
1.12	Flor de Jamaica ( <i>Hibiscus Sabdariffa</i> L.). Fuente: shutterstock.com. . .	19
1.13	Diagrama del proceso de deshidratación osmótica. Adaptado de:Yadav & Singh 2012. . . . .	21
1.14	Diagrama esquemático del sistema de fritura con aire caliente. Fuente: apds.nl. . . . .	25

2.1	Diagrama esquemático de la configuración experimental para la deshidratación osmótica de cubos de papaya. . . . .	45
2.2	Diagrama de flujo del algoritmo para evaluar las derivadas de pérdida de agua y ganancia de soluto con término de acoplamiento. *Con regla del trapecio. **Con modelo de encogimiento determinado experimentalmente.	53
2.3	Geometrías utilizadas de (a) papaya y (b) piña. . . . .	58
2.4	Deshidratado de flores de Jamaica ( <i>Hibiscus Sabdariffa</i> ). . . . .	58
2.5	Proceso para la obtención del polvo de flor de Jamaica. . . . .	59
2.6	Diagrama que muestra la ubicación de las condiciones de frontera de la sección de cilindro anular usado para representar las muestras de piña.	68
3.1	Comparación de la pérdida de agua y ganancia de sólidos experimentales y ajustados bajo diferentes consideraciones de modelado. . . . .	78
3.2	Comparación de la reducción de peso experimental y predicha bajo diferentes consideraciones de modelado. . . . .	79
3.3	Comparación del índice de deshidratación experimental y predicho bajo diferentes consideraciones de modelado. . . . .	80
3.4	Efecto de la relación final de deshidratación osmótica ( $c_1$ ) y la relación de difusividad de soluto-agua ( $c_2$ ) en la reducción de peso adimensional (a-c) y el índice de deshidratación adimensional (d). . . . .	83
3.5	Características de encogimiento de los cubos de papaya durante la deshidratación osmótica a diferentes temperaturas. . . . .	86
3.6	Cambios de la densidad de cubos de papaya durante la deshidratación osmótica a diferentes temperaturas. . . . .	88

3.7	Resultados experimentales (puntos) y modelados (líneas) de (a) pérdida de agua, (b) ganancia de soluto, (c) reducción de peso, (d) e índice de deshidratación de cubos de papaya impregnados con extracto de Jamaica con sacarosa añadida. . . . .	99
3.8	Características de encogimiento de los cubos de papaya durante la impregnación con extracto de jamaica con sacarosa añadida a diferentes temperaturas. . . . .	101
3.9	Evolución experimental (puntos) y predicha (líneas) de (a) compuestos fenólicos totales, (b) antocianinas totales y (c) capacidad antioxidante total durante la impregnación de papaya con extracto de jamaica con sacarosa añadida. . . . .	103
3.10	Características de color de cubos de papaya impregnados con extracto de jamaica con sacarosa añadida. Los números dentro de las celdas son los valores de color CIELAB (media $\pm$ S.D.). . . . .	105
3.11	Resultados experimentales (puntos) y modelados (líneas) de (a) pérdida de agua, (b) ganancia de soluto, (c) reducción de peso, (d) e índice de deshidratación de piña impregnada con extracto de Jamaica con sacarosa añadida. . . . .	112
3.12	Características de encogimiento de piña durante su impregnación con extracto de Jamaica con sacarosa añadida a diferentes temperaturas. . . . .	114
3.13	Evolución experimental (puntos) y predicha (líneas) de (a) compuestos fenólicos totales, (b) antocianinas totales y (c) capacidad antioxidante total durante la impregnación de piña con extracto de Jamaica con sacarosa añadida. . . . .	115

3.14 Características de color de secciones de cilindro anular de piña impregnadas. Los números dentro de las celdas son los valores de color CIELAB (media  $\pm$  S.D.). . . . . 117

# Índice de tablas

1.1	Esqueletos estructurales de compuestos fenólicos y polifenólicos. . . . .	7
1.2	Diferentes metodologías para determinar la capacidad antioxidante. . .	13
1.3	Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de papaya ( <i>Carica papaya</i> L). 16	
1.4	Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de piña ( <i>Ananas comosus</i> L). 18	
1.5	Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de flor de Jamaica ( <i>Hibiscus Sabdariffa</i> ). . . . .	20
1.6	Productos sometidos a proceso de fritura. . . . .	24
1.7	Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de difusional. . . . .	28
1.8	Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de superficie respuesta. . . . .	30
1.9	Productos deshidratados osmóticamente modelados modelados con el modelo de Azuara. . . . .	32
1.10	Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Peleg. . . . .	34
1.11	Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Page. . . . .	35
1.12	Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Magee. . . . .	36

1.13	Trabajos sobre incorporación de compuestos bioactivos en matrices alimenticias. . . . .	38
2.1	Descripción de las consideraciones de modelado para estimar los coeficientes de difusión. . . . .	55
3.1	Caracterización fisicoquímica de los extractos de papaya, piña, Jamaica (EJ) y solución de EJ/sacarosa (SEJS). . . . .	74
3.2	Efecto de los supuestos de modelado sobre los parámetros de transferencia de masa estimados (valores de equilibrio estimados libremente). . . . .	90
3.3	Efecto de los supuestos del modelo sobre los parámetros de transferencia de masa estimados (los valores de equilibrio se preestablecieron como los obtenidos con el modelo <i>A</i> presentado en la Tabla 2). . . . .	96
3.4	Parámetros de transferencia de masa estimados durante la impregnación de cubos de papaya con extracto de Jamaica con sacarosa añadida. . . . .	108
3.5	Parámetros de transferencia de masa estimados durante la impregnación de sección de cilindro anular de piña con <i>SEJS</i> . . . . .	119
3.6	Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto fresco. . . . .	120
3.7	Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto impregnado. . . . .	121
3.8	Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto frito. . . . .	122

# Nomenclatura

<i>A</i>	absorbancia (adimensional)
<i>ANT</i>	contenido de antocianinas totales (mg C3G/100g producto)
<i>ATT</i>	acidez titulable (g ACA/100 g)
<i>c, C</i>	concentración local y volumen promedio respectivamente (kg/m <sup>3</sup> )
<i>C, C*</i>	concentración volumétrica en fase sólida y líquida respectivamente (kg/m <sup>3</sup> )
<i>C3G</i>	cianidin-3-glucósido
<i>CAT</i>	capacidad antioxidante total (mg TE/100 g producto)
<i>CFT</i>	compuestos fenólicos totales (mg GAE/ 100 g producto fresco)
<i>Cp</i>	calor específico (J/Kg/K)
<i>D</i>	difusividad efectiva de la sustancia que se transfiere (m <sup>2</sup> /s)
<i>d</i>	factor de dilución (adimensional)
<i>GS</i>	ganancia de soluto (g soluto/100 g producto fresco)
<i>h<sub>m</sub></i>	coeficiente de transferencia de masa convectiva (m/s)
<i>K</i>	coeficiente de partición de masa entre las fases fluida y sólida
<i>k</i>	constante del modelo
<i>L</i>	longitud característica para la difusión (m)
<i>l</i>	longitud de la celda (cm)

$L^*, a^*, b^*$	parametros de color CIELAB (adimensional)
$M$	peso molecular de C3G (g/mol)
$m$	masa (kg)
$MRD$	desviación media relativa (%)
$N$	número de nodos
$n$	número de experimentos totales por temperatura de OD
$p_j$	parámetro que determina la relación de aspecto de un paralelepípedo
$PA$	pérdida de agua (g agua/100 g producto fresco)
$RSS$	suma residual de cuadrados
$SST$	sólidos solubles totales (°Bx)
$T$	temperatura (°C)
$t$	tiempo (s)
$V$	volumen (m <sup>3</sup> )
$x$	fracción másica (kg/ kg producto fresco)
$x_j$	coordenadas rectangulares (j=1,2,3)
$Y$	fracción de agua (kg/kg)
$y$	relación masa-volumen inicial instantanea (kg/m <sup>3</sup> <i>producto fresco</i> )
$z$	relación masa-substancia que se difunde instantanea (kg/m <sup>3</sup> <i>producto fresco</i> )

**Letras griegas**

$\gamma$	cambio relativo de la sustancia que se difunde en fase sólida (kg/ kg producto fresco)
$\phi$	inverso del volumen del producto ( $m^{-3}$ )
$\psi, \Psi$	concentración local y volumen promedio, respectivamente (adimensional)
$\rho$	densidad de producto ( $kg/m^3$ )
$\rho_y$	relación inicial a volumen instantáneo ( $m^3 \text{ producto} / m^3 \text{ producto fresco}$ )
$\rho_{zj}$	relación inicial de masa de j a volumen instantáneo ( $kg/m^3 \text{ producto}$ )
$\tau$	número de Fourier para transferencia de masa (adimensional)
$\varepsilon$	fracción de agua (kg/kg)
$\xi_j$	coordenadas rectangulares adimensionales (j=1,2,3)

**Subíndices**

0	al inicio de la impregnación
1	valor mínimo alcanzable de humedad
$\infty$	valor en el equilibrio
<i>e</i>	en equilibrio
<i>exp</i>	denota valores experimentales
<i>p</i>	se refiere al producto

<i>s</i>	para sólidos totales
<i>sim</i>	denota valores simulados
<i>w</i>	para agua

# Introducción

En las últimas décadas tanto el estilo de vida de la población como sus hábitos de alimentación han cambiado radicalmente, motivo por el cual los consumidores se han preocupado por ingerir alimentos que les brinden los nutrientes necesarios para prevenir enfermedades. En respuesta a esta demanda en la década de los 80's surge el concepto de alimentos funcionales, el cual se define como cualquier alimento modificado o ingrediente alimentario que pueda proporcionar un beneficio para la salud más allá de los nutrientes tradicionales que contiene. Esta tendencia ha promovido la utilización de compuestos bioactivos en conjunto con tecnologías emergentes para poder ser incorporadas a los alimentos.

Recientemente se ha reportado que una de las formas para incorporar los compuestos bioactivos es mediante la impregnación, puesto que es una técnica sencilla para introducir diferentes compuestos promotores de la salud en matrices alimenticias, por ejemplo, vitaminas, minerales, antioxidantes, probióticos, entre otros. Aunado a los beneficios a los consumidores, también se ha reportado que estos compuestos, sobre todo los antioxidantes, contribuyen a alargar la vida de anaquel de los productos. Esta operación se combina con un proceso de deshidratación osmótica (DO) con el fin de remover el agua de forma parcial, aumentar los sólidos en el alimento y hacerlo más estable. Por su parte, el freído es otro proceso que se puede utilizar en conjunto con la impregnación/DO, ya que se puede obtener un producto estable con una absorción reducida de aceite debido a la deshidratación parcial previa.

Por lo anterior, en el presente trabajo se propuso realizar el estudio de transferencia de masa durante la impregnación de compuestos antioxidantes en diversos productos vegetales, así como su comportamiento después del proceso de fritura por aire caliente.

# I. Antecedentes

## 1.1. Alimentos funcionales

En la actualidad existe una creciente demanda derivada del costo de la atención médica, así como el aumento de la esperanza y calidad de vida de la población, por lo que los alimentos funcionales han jugado un papel sobresaliente al respecto durante estas últimas décadas.

El concepto de alimentos funcionales surgió en Japón a principios de la década de 1980, donde se creó el primer sistema regulatorio denominado “Alimentos para uso específico de la salud” (FOSHU, por las siglas en inglés de “Food for Specified Health Uses”) (Maeda-Yamamoto, 2017; Martirosyan & Singh, 2015). Sin embargo, el concepto ha sufrido diferentes modificaciones desde entonces por diferentes instancias gubernamentales internacionales. En el 2014 se realizó la última actualización en la 17° Conferencia Internacional de Investigación organizada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por las siglas en inglés de “United States Department of Agriculture”) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS, por las siglas en inglés de “Agricultural Research Service”), dando como resultado la nueva definición de alimentos funcionales que los denomina como “alimentos naturales o procesados los cuales presentan compuestos biológicamente activos conocidos o desconocidos que en cantidades definidas, efectivas y no tóxicas, proporcionan un beneficio para la salud clínicamente probado y documentado para la prevención, manejo o tratamiento de enfermedades crónicas” (Martirosyan & Singh, 2015). Por lo anterior, el desarrollo de los alimentos funcionales ha generado un área de oportunidad para prevenir las principales causas de muerte, por ejemplo, enfermedades cardiovasculares, diabetes y

cáncer al incluirlos en la dieta (Helkar et al., 2016).

Dentro de los principales compuestos bioactivos mayormente reportados y utilizados en conjunto con diferentes tecnologías para el desarrollo de alimentos funcionales se encuentran los probióticos/prebióticos/simbióticos y los antioxidantes (Granato et al., 2020), los cuales se describen a continuación:

### **1.1.1. Probióticos, prebióticos y simbióticos**

Los probióticos son microorganismos vivos que contribuyen al equilibrio de la flora intestinal fortaleciendo el sistema inmunológico. Dentro de los más conocidos se encuentran *Lactobacillus bulgaris*, *Streptococcus termophilus*, *Lactobacillus casei*, etc.(Hill et al., 2014). Por su parte, los prebióticos son un tipo de fibra dietética la cual tiene la capacidad de mejorar la supervivencia, crecimiento y metabolismo de los probióticos en el sistema digestivo (lactulosa, galactooligosacáridos, fructooligosacáridos, inulina, entre otros.)(Gibson et al., 2017). Respecto a los simbióticos, son una mezcla de probióticos y prebióticos que en conjunto brindan efectos benéficos al consumidor al mejorar la sobrevivencia de los microorganismos vivos en el sistema digestivo en comparación con su uso separado (Mohanty et al., 2018).

### **1.1.2. Antioxidantes**

Los antioxidantes han sido utilizados para diversos fines en la industria alimentaria. En la década de los 30's los ocupaban como aditivos para prevenir la oxidación en los aceites comestibles (Carocho et al., 2018). Para 1970 se demostró mediante pruebas clínicas que tenían la capacidad de inhibir los procesos de oxidación debidos al estrés oxidativo (Cömert & Gökmen, 2018). Recientemente, se ha reportado que los antioxidantes (en bajas concentraciones) al ser utilizados conjuntamente con sustra-

tos oxidables logran inhibir la oxidación del sustrato (Halliwell & Gutteridge, 2015). Dentro de los principales compuestos considerados como agentes antioxidantes se encuentran los compuestos fenólicos, carotenoides, flavonoides, antocianinas, terpenoides y algunos lípidos (Granato et al., 2020).

## **1.2. Compuestos bioactivos con capacidad antioxidante**

Los compuestos bioactivos son componentes químicos que contribuyen a regular los mecanismos biológicos del organismo. De acuerdo con Martirosyan & Pisarski (2017) son metabolitos primarios y secundarios de componentes naturales nutritivos y no nutritivos que generan beneficios para la salud al prevenir o controlar las enfermedades crónicas o sus síntomas. Dentro de este grupo de compuestos se encuentran los antioxidantes naturales que han sido considerados una forma prometedora para la prevención y tratamiento de enfermedades cardiovasculares y cáncer (Martirosyan & Miller, 2018). Este tipo de antioxidantes se encuentran principalmente en frutas y verduras, las cuales presentan diferentes contenidos de antioxidantes de forma natural con una variedad de estructuras químicas. Dentro de los principales compuestos con capacidad antioxidante se encuentran vitaminas (vitamina C y vitamina E), carotenoides (carotenos y xantofilas), polifenoles (flavonoides, antocianinas, ácidos fenólicos, lignanos y estilbenos) (Oroian & Escriche, 2015) y betalaínas (Albano et al., 2015).

### **1.2.1. Compuestos fenólicos**

Los compuestos fenólicos representan el grupo más abundante de los compuestos orgánicos que se encuentran distribuidos tanto en los tejidos de las plantas como en

sus partes comestibles tales como frutos, semillas, hojas, tallos, raíces, etc. Se definen como metabolitos secundarios que sintetizan las plantas durante su desarrollo normal como respuesta a condiciones de estrés, por ejemplo, radiación solar UV, estrés biótico o abiótico, patógenos, presencia de herbívoros, etc. (de la Rosa et al., 2019; Hogervorst et al., 2017; Ozcan et al., 2014). Este tipo de compuestos también son responsables de brindar sustancias que dan color (pigmentos amarillo, naranja, rojo y azul) y sabor (vainillina y eugenol) en los alimentos (Cheynier, 2012; Ozcan et al., 2014). En cuanto a su proceso de síntesis, los compuestos fenólicos son derivados de diferentes vías como pentosa-fosfato, ácido shikímico y fenilpropanoide (Figura 1.1)(Morandi et al., 2019; Ozcan et al., 2014).

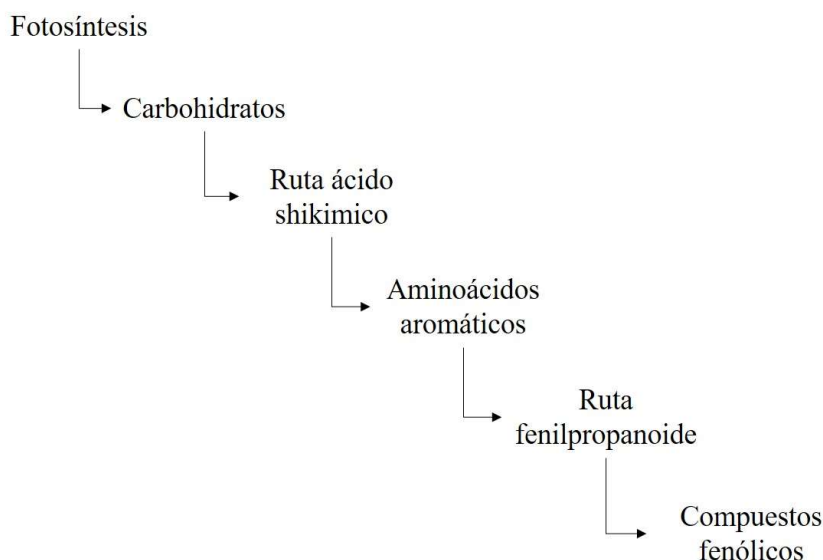


Figura 1.1. Rutas biosintéticas que conducen a la síntesis de los compuestos fenólicos. Adaptado de Morandi et al. (2019).

Por lo anterior, los compuestos fenólicos han sido ampliamente estudiados dada su capacidad para contrarrestar el estrés oxidativo al ser incluidos en la dieta humana (frutas y verduras), puesto que el estrés oxidativo crónico está asociado a varios

trastornos del metabolismo, por ejemplo, obesidad, diabetes, cáncer y/o enfermedades cardiovasculares (Cheynier, 2012; de la Rosa et al., 2019; Morandi et al., 2019).

Respecto a su poder antioxidante, los compuestos fenólicos presentan propiedades reductoras (agentes de donación de hidrógeno o electrones), que predicen su potencial de acción como captadores de radicales libres (antioxidantes), además de tener la capacidad de quelar metales como hierro y cobre (Morandi et al., 2019). Por otra parte, la estructura de los compuestos fenólicos se encuentra relacionada con su actividad antioxidante, puesto que se conforma por un anillo aromático que contiene uno o más sustituyentes hidroxilo; el anillo también suele asociarse con uno o más grupos fenólicos, así como con ésteres y ésteres metílicos (Figura 1.2) (de la Rosa et al., 2019; Morandi et al., 2019; Ozcan et al., 2014).

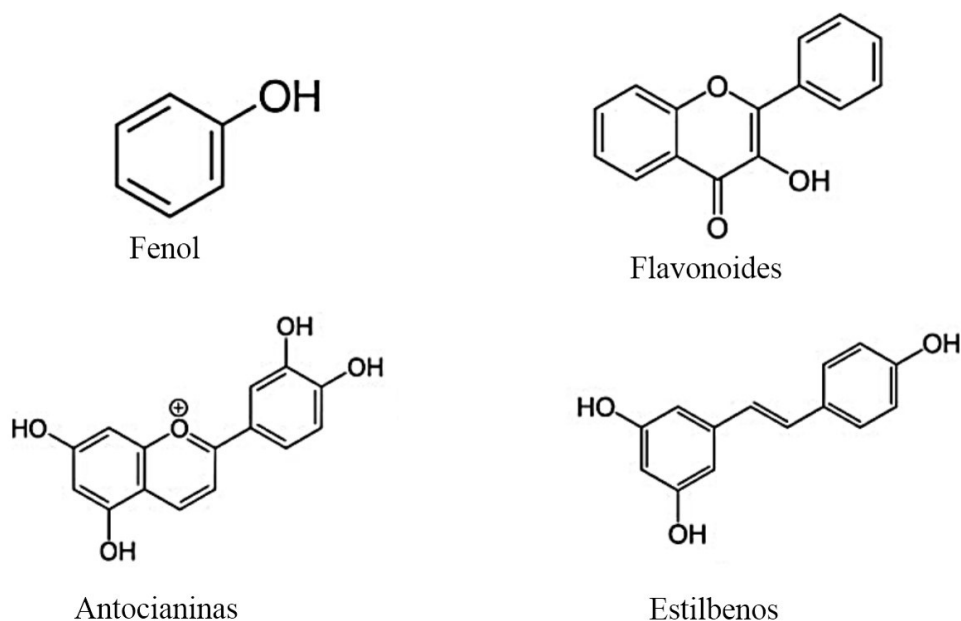


Figura 1.2. Estructuras químicas de compuestos fenólicos comunes.

Los compuestos fenólicos se pueden clasificar en dos principales grupos: flavonoides y no flavonoides (Figura 1.3)(de la Rosa et al., 2019; Hogervorst et al., 2017).

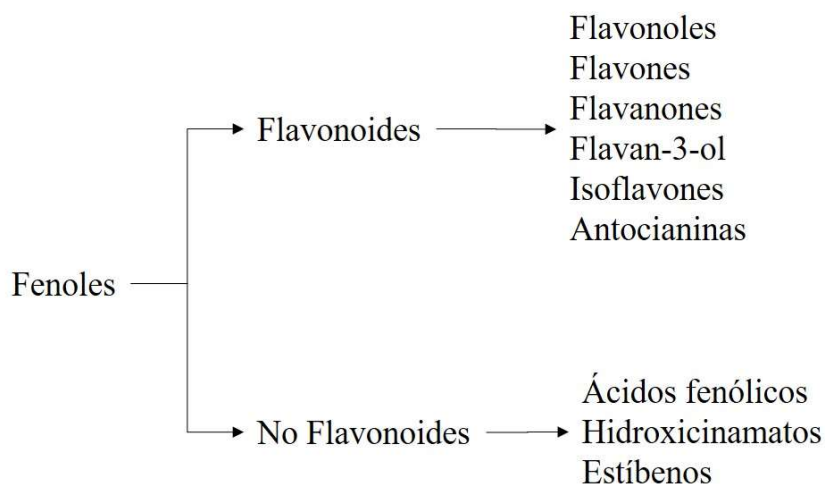


Figura 1.3. Clasificación de los compuestos fenólicos. Adaptado de Ozcan et al. (2014) y Morandi et al. (2019).

Otra forma de clasificar a los compuestos fenólicos es de acuerdo a sus vías de biosíntesis en flavonoides, derivados fenólicos y polifenoles, terpenoides y alcaloides que contienen nitrógeno y compuestos que contiene azufre. También los han clasificado de acuerdo con el número y arreglo de sus átomos de carbono (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Esqueletos estructurales de compuestos fenólicos y polifenólicos (Morandi et al., 2019).

Número de carbonos	Estructura general	Clasificación
6	C <sub>6</sub>	Fenoles simples
7	C <sub>6</sub> -C <sub>1</sub>	Ácidos fenólicos
8	C <sub>6</sub> -C <sub>2</sub>	Ácido fenilacético, ácido hidroxicinámico
9	C <sub>6</sub> -C <sub>3</sub>	Coumarinas
13	C <sub>6</sub> -C <sub>1</sub> -C <sub>6</sub>	Xantonas
14	C <sub>6</sub> -C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	Estilbenos
15	C <sub>6</sub> -C <sub>3</sub> -C <sub>6</sub>	Flavonoides



Este tipo de compuestos han sido asociados con diversas aplicaciones funcionales dado su amplio espectro de actividad biológica, por ejemplo, antialérgico, antimutagénico, modulante de actividad enzimática y actividad anticancerígena (Wen et al., 2017). En cuanto a su estructura química presenta un esqueleto constituido por 15 carbonos organizados en tres anillos, dos anillos fenil unidos (A y B) a un anillo herterocíclico pirano (C) (Figura 1.5).

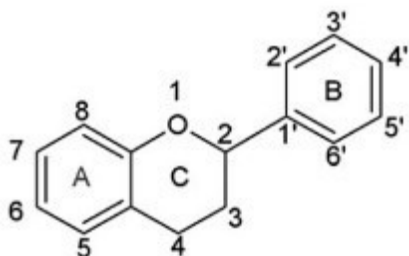


Figura 1.5. Estructura básica de los flavonoides donde (A) y (B) son anillos fenil y (C) es un anillo heterocíclico pirano.

Por lo general, los flavonoides se pueden clasificar de acuerdo con la sustitución en las dispersiones de los grupos laterales de hidroxilo, metoxilo, prenilo y glucosídico, así como también en base a la conjugación entre anillos, formando seis grupos: flavanonas, flavonas, flavanoles, isoflavanoles, antocianinas y chalconas (Figura 1.6).

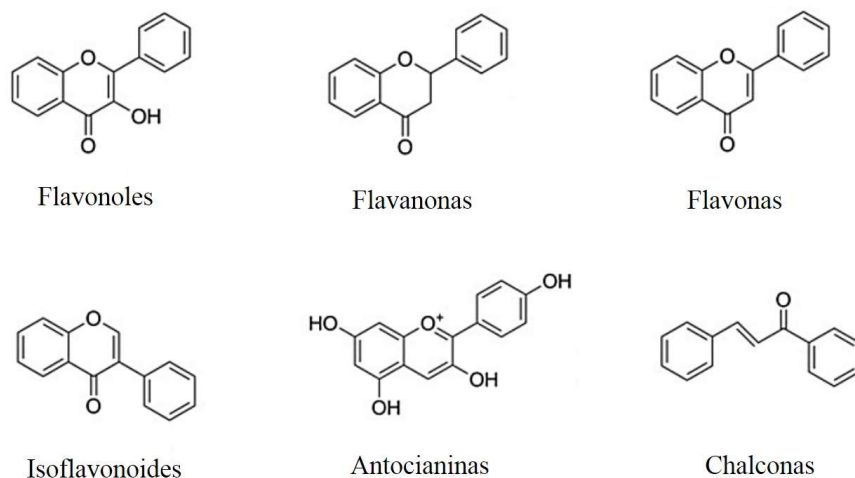


Figura 1.6. Clasificación de flavonoides y sus estructuras.

Por su parte, las flavonas son uno de los subgrupos importantes de los flavonoides. Se encuentran ampliamente presentes en hojas de productos vegetales, flores y frutos en forma de glucósidos. Un ejemplo de productos que contienen principalmente flavonas son la cáscara de los cítricos (polimetoxiladas, tangeretina, nobiletina y sinetina) (Jiang et al., 2016). Otro subgrupo importante de los flavonoides son los flavonoles, estos tienen como función principal ser los bloques de construcción de proantocianidinas. La quercetina, miricetina y fisetina están dentro de los flavonoles mayormente estudiados (Figura 1.7). Este tipo de compuestos se encuentran en la cebolla, lechuga, col, tomates, manzana, uva y bayas (Panche et al., 2016).

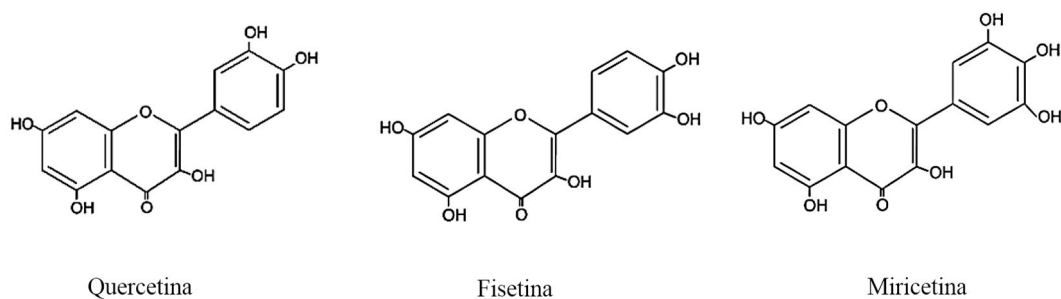


Figura 1.7. Ejemplos de estructuras de flavonoles.

### 1.2.3. Antocianinas

Las antocianinas son glucósidos de las antocianidinas, derivados de los flavonoides, producidos a través de la ruta de los fenilpropanoides, son solubles en agua y se encuentran presentes ampliamente en productos de origen vegetal como bayas rojas y moradas, uvas, manzanas, ciruelas, col, etc. (Khoo et al., 2017). Las antocianinas mayormente estudiadas son cianidina, delphinidina, malvidina, pelargonidina y peonidina (Figura 1.8)(Panche et al., 2016).

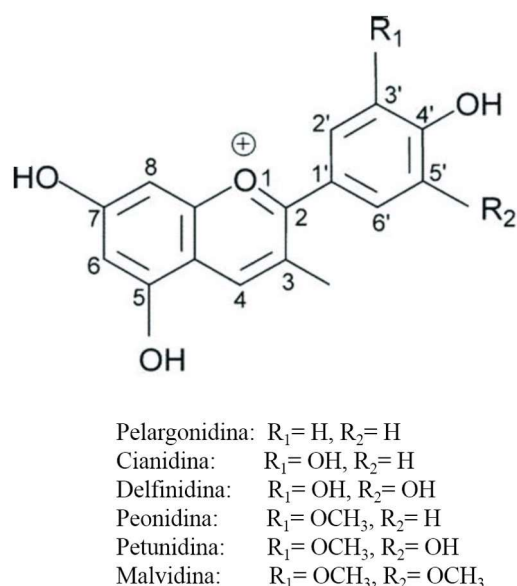


Figura 1.8. Antocianinas más comunes en flores y frutos (Moreno et al., 2010).

El color y la estabilidad de estos pigmentos dependen del pH, luz, temperatura y estructura. Presentan la estructura del anillo B glicosilada, lo cual contribuye a la alta actividad antioxidante dada la ortohidroxilación y la metoxilación que fomentan sustancialmente su actividad (Khoo et al., 2017). Este tipo de compuestos son potencialmente útiles como ingredientes nutracéuticos, ya que proporcionan numerosos efectos beneficiosos para la salud. Por ejemplo, disminuyen el estrés oxidativo, actúan

como sustancias antimicrobianas, contrarrestan la aparición de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, metabólicas y el cáncer (Mattioli et al., 2020).

### **1.3. Capacidad antioxidante**

Los antioxidantes presentes en los alimentos pertenecen a una categoría heterogénea de moléculas, los cuales están compuestos de sistemas que pueden intercambiar sus radicales libres de forma segura y terminar la reacción en cadena antes de que las moléculas vitales puedan ser dañadas (Oroian & Escriche, 2015). La actividad antioxidante de muchas sustancias depende del metabolismo celular y son conocidas como antioxidantes endógenos, entre los cuales están la superóxido-dismutasa, las catalasas y el glutatión. También existen factores nutricionales conocidos como antioxidantes exógenos, siendo los más estudiados el alfa-tocoferol, el betacaroteno, el ácido ascórbico y los polifenoles (Pisoschi et al., 2021).

La capacidad antioxidante total es el indicativo de la forma de actuar colaborativamente (efecto aditivo y posiblemente sinérgico) de todos los antioxidantes presentes en una muestra compleja. Es el parámetro mayormente reportado para evaluar las defensas antioxidantes en alimentos o plasma, en lugar de determinar por separado las concentraciones de los constituyentes antioxidantes individuales (Apak et al., 2016). Es importante mencionar que la capacidad antioxidante de los compuestos fenólicos está directamente relacionada con su estructura química, como el grado de glucosilación y el número, así como la posición, de los grupos hidroxilo (Hernández-Rodríguez et al., 2019).

La capacidad antioxidante de frutos puede evaluarse *in vitro* e *in vivo* con base a las reacciones químicas involucradas principalmente en dos categorías:

- Basadas en la transferencia de un átomo de hidrógeno, donde el antioxidante y el sustrato compiten por el radical libre sintético, una molécula es oxidable y la otra antioxidante (Cerretani & Bendi, 2010).
- Basadas en la transferencia de electrones, involucra una reacción de oxidación con el antioxidante que es un indicador del punto final de la misma (Cerretani & Bendi, 2010).

En la Tabla 1.2 se muestran los métodos según la reacción utilizada para la cuantificación de la actividad antioxidante.

Tabla 1.2. Diferentes metodologías para determinar la capacidad antioxidante.

Mecanismo	Método
Por transferencia de un átomo de hidrógeno	ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity)
	TRAP (Total Radical Trapping Antioxidant Parameter)
	IOU (Inhibited Oxygen Uptake)
Por transferencia de electrones	TEAC (Trolox Equivalente Antioxidant Capacity)
	FRAP (Ferric Ion Reducing Antioxidant Parameter)
	DPPH+ (2,2-difenil-1-picrilhidracilo)
	ABTS+ (2,2'-Azino-bis (3-etilenbenzotiazolino-6-ácido sulfónico))

De los métodos mencionados anteriormente la reducción del compuesto DPPH es el que mayormente se reporta; este compuesto se caracteriza por poseer un electrón desapareado que es el radical libre estable 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH), estabilizado por resonancia. Dada esta propiedad el compuesto DPPH se utiliza como reactivo de referencia para determinar el poder antioxidante de una sustancia por captura de radicales libres (Mubarak et al., 2019). Este método permite la evaluación de

la actividad de sustancias con su radical en una solución etanólica que tiene un color violeta intenso que se pierde progresivamente a color amarillo cuando se añade la muestra que contiene antioxidantes. La decoloración de radical se determina alrededor de 517 nm y la cuantificación se realiza por lo general empleando soluciones de trolox (análogo sintético de la vitamina E) (Cerretani & Bendi, 2010).

Cuando una disolución de DPPH entra en contacto con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno o con otra especie radical (*R*) se produce la forma reducida DPPH-H o DPPH-R con la consecuente pérdida de color (Figura 1.9) y por lo tanto la pérdida de la absorbancia (Mubarak et al., 2019).

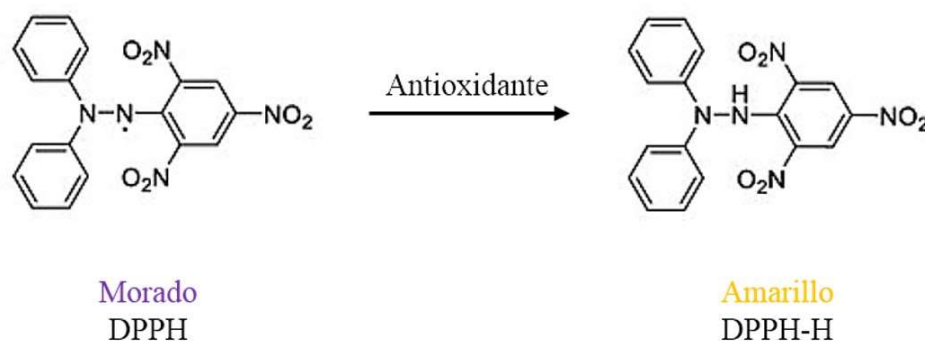


Figura 1.9. Reacción química entre el radical DPPH y la especie antioxidante (Mubarak et al., 2019).

## 1.4. Alimentos de origen vegetal ricos en compuestos antioxidantes

Los compuestos antioxidantes como se mencionó anteriormente existen en diversos alimentos principalmente en frutas, verduras, flores y especias (Al-juhaimi et al., 2018). A continuación, se presentan algunos alimentos los cuales han sido reportados por la diversidad y cantidad de antioxidantes que presentan.

### 1.4.1. Papaya (*Carica papaya* L.)

La planta de papaya proviene originalmente del sur de México y América central, es una planta perenne la cual se distribuye actualmente por toda el área subtropical (Addai et al., 2013) (Figura 1.10).



Figura 1.10. Planta de papaya (*Carica papaya* L.). Fuente: iStockphot.com.

Sus frutos se caracterizan por ser bajos en calorías además de que contienen compuestos bioactivos como flavonoides, carotenoides, polifenoles y complejos de vitaminas A, B y C, así como calcio, fósforo, magnesio, hierro, azufre, sodio, potasio y fibra dietética (Gayosso-García et al., 2018; Lobo & Pastor, 2012; Parven et al., 2020). Es especialmente rica en carotenoides como licopeno,  $\beta$ -criptoxantina y  $\beta$ -caroteno (Fabi et al., 2012; Gayosso-García et al., 2010). Además de sus propiedades antioxidantes se le han atribuido propiedades inmunoestimulantes y antivirales (Asghar et al., 2016). En la Tabla 1.3 se muestran las características fisicoquímicas y compuestos bioactivos en papaya fresca reportados por diversos autores.

Tabla 1.3. Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de la papaya (*Carica papaya* L).

Parámetro	Unidades	Valor/rango	Referencia
Humedad	g/100g	88.99 ± 0.67	Soto et al. (2021)
	g/100g	94.2 ± 2.9	Chandra et al. (2020)
	g/100g	89–93	Gayosso-García et al. (2010)
SST	°Bx	10.91 ± 0.01	Gomes et al. (2018)
	°Bx	3.7–9.2	Gayosso-García et al. (2010)
AT	% ácido cítrico	0.1–0.13	Gayosso-García et al. (2010)
	% ácido cítrico	0.10–0.18	Othman (2009)
pH	-	3.79 ± 0.01	Gomes et al. (2018)
	-	3.6–5.3	Patil et al. (2021)
	-	5.6–5.8	Gayosso-García et al. (2010)
Índice de madurez	-	58–72	Gayosso-García et al. (2010)
$L^*$	-	56.91–60.11	de Vasconcellos Santos Batista et al. (2019)
$a^*$	-	22.50–24.60	de Vasconcellos Santos Batista et al. (2019)
$b^*$	-	42.30–42.75	de Vasconcellos Santos Batista et al. (2019)
CFT	mg GAE/100g b.h.	38	Asghar et al. (2016)
	mg GAE/100g b.h.	74–91	Chan-León et al. (2021)
CAT	mmol TE/100g b.h.	16–21	Uribe et al. (2015)

#### 1.4.2. Piña (*Ananas comosus* L.)

La piña representa uno de los cultivos más importantes en regiones tropicales y subtropicales a nivel mundial (Lu et al., 2014; Shamsudin et al., 2007) . Es una fuen-

te importante de azúcares, ácidos orgánicos (oxálico, tartárico, propiónico, cítrico y málico) (Sarkar et al., 2020) y minerales (K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y Cu) (Lu et al., 2014)(Figura 1.11).



Figura 1.11. Planta de piña (*Ananas comosus* L.) con fruto. Fuente: iStockphot.com.

Es una fruta rica en antioxidantes como ácido ascórbico, flavonoides y otros compuestos fenólicos que brindan beneficios a la salud al ser incluidos en la dieta diaria (Lu et al., 2014). La piña está relacionada por su coloración con compuestos carotenoides, el  $\beta$ -caroteno es el que imparte aproximadamente el 35% del total de pigmentos (Freireira et al., 2016). Tanto el  $\beta$ -caroteno como el  $\alpha$ -caroteno y la criptoxantina destacan por su actividad de provitamina A, al convertirse en vitamina A o retinol después de la ingestión. Además, los carotenoides tienen acción antioxidante, protegen las células y los tejidos del daño causado por los radicales libres, fortalecen el sistema inmunológico e inhiben el desarrollo de ciertos tipos de cáncer (Ramallo & Mascheroni, 2012). También exhiben altos niveles de otros antioxidantes como los compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante (Tabla 1.4)(Correa et al., 2017).

Tabla 1.4. Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de la piña (*Ananas comosus* L.).

Parámetro	Unidades	Valor/rango	Referencia
Humedad	g/100g	84.87–86.79	Kongsuwan et al. (2009)
SST	°Bx	11–15	Padrón-Mederos et al. (2020)
	°Bx	14.4–20.4	Lu et al. (2014)
	°Bx	12.25–20.45	Ferreira et al. (2016)
pH	-	3.55–4.56	Kongsuwan et al. (2009)
	-	3.61–4.16	Lu et al. (2014)
	-	3.31 ± 0.04	Padrón-Mederos et al. (2020)
ATT	mg/100g	1.18 ± 0.05	Padrón-Mederos et al. (2020)
	% ácido cítrico	0.65–0.68	Kongsuwan et al. (2009)
	% ácido cítrico	0.46–1.23	Lu et al. (2014)
Índice de madurez	-	11.75–41.08	Lu et al. (2014)
$L^*$	-	65.96–77.79	Ferreira et al. (2016)
$a^*$	-	-3.68– -1.31	Ferreira et al. (2016)
$b^*$	-	12.05–23.09	Ferreira et al. (2016)
CFT	mg/100g	29.8 ± 0.4	Padrón-Mederos et al. (2020)
	mg GAE/100g b.h.	20.28–26.20	Kongsuwan et al. (2009)
	mg GAE/100g b.h.	31.48–77.55	Lu et al. (2014)
	mg GAE/100g	71.07–126.95	Ferreira et al. (2016)
	mg/g	2.6–51.1	Hossain & Rahman (2011)
CAT	mg TE/100g	2.63 ± 0.06	Padrón-Mederos et al. (2020)
	mol TE/100g b.h.	118.18–152.93	Kongsuwan et al. (2009)
	μmol TE/100g b.h.	3.68–22.85	Lu et al. (2014)

### 1.4.3. Flor de Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa*)

La Jamaica es un arbusto anual de la familia Malvaceae, crece en regiones tropicales y subtropicales (Sudán, América y el sur de Asia) (Borrás-Linares et al., 2015; Cid-Ortega & Guerrero-Beltran, 2012). La parte comercialmente importante de la planta son sus cálices (llamados comúnmente flor de Jamaica) que contienen cantidades significativas de carbohidratos, proteínas, fibra cruda y ácidos orgánicos, pero su importancia comercial se debe a su contenido de antocianinas (Figura 1.12). Aunado a esto diversos autores han reportado propiedades antibacteriales, antiinflamatorios, diuréticas, antipiréticas, hepatoprotectores, hipotensoras, antiolesterol, hipoglucéicas y antitumorales (Grajeda-Iglesias et al., 2016).



Figura 1.12. Flor de Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa* L.). Fuente: shutterstock.com.

Se ha reportado que presenta diversos componentes bioactivos como compuestos fenólicos, flavonoides (quercetina, luteolina y gossipelina), antocianinas (cianidin-3-glucósido, delphinidina-3-glucósido, cianidin-3-sambubiosido y delphinidin-3-sambubiosido) y capacidad antioxidante (Tabla 1.5)(Anokwuru et al., 2011; Cissé et al., 2011; Zhen et al., 2016).

Tabla 1.5. Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de flor de Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa*).

Parámetro	Unidades	Valor/rango	Referencia
Humedad	g/kg	103.81 ± 0.09	Jung et al. (2013)
SST	°Bx	5.97–6.3	Chumsri et al. (2008)
pH	-	2.26 – 2.47	Sukkhaeng et al. (2018)
	-	2.42 – 2.49	Jung et al. (2013)
ATT	% ácido málico	1.71–2.00	Chumsri et al. (2008)
	g ácido málico/100ml	2.23–2.62	Jung et al. (2013)
<i>L</i> *	-	6.93–40.18	Chumsri et al. (2008)
<i>a</i> *	-	36.09–68.70	Chumsri et al. (2008)
<i>b</i> *	-	11.79–70.54	Chumsri et al. (2008)
CFT	mg GAE/g b.s.	306	Ochoa-Velasco & Ruiz-López (2019)
	mg GAE/g b.h.	1951	Yang et al. (2012)
	mg GAE/g b.h.	424	Hernández-Carranza et al. (2022)
ANT	mg /100g b.s.	1181.80–1998.43	Sukkhaeng et al. (2018)
	mg C3G/g b.s.	4.55–5.02	Chumsri et al. (2008)
	mg C3G/g b.h.	18	Yang et al. (2012)
	mg C3G/g b.h.	290	Hernández-Carranza et al. (2022)
CAT	mg TE/g b.s.	541	Ochoa-Velasco & Ruiz-López (2019)
	mg TE/100 g b.h.	1815	Hernández-Carranza et al. (2022)

## 1.5. Proceso de deshidratación osmótica/impregnación

La deshidratación osmótica consiste en un proceso de transporte de masa donde un alimento se sumerge en una solución acuosa concentrada (salmuera o jarabe) y la fuerza impulsora requerida para el flujo de masa es la diferencia del potencial químico

entre la dilución y el fluido intracelular (Ahmed et al., 2016). Durante este proceso se llevan a cabo dos fenómenos de forma simultánea, por un lado, la eliminación de agua y por otro la incorporación de solutos en la matriz alimenticia. En tejidos vegetales se encuentran membranas celulares, las cuales permiten el libre paso de las moléculas del disolvente y también el paso de algunas moléculas de soluto, pero en menor grado (Castelló et al., 2010)(Figura 1.13).

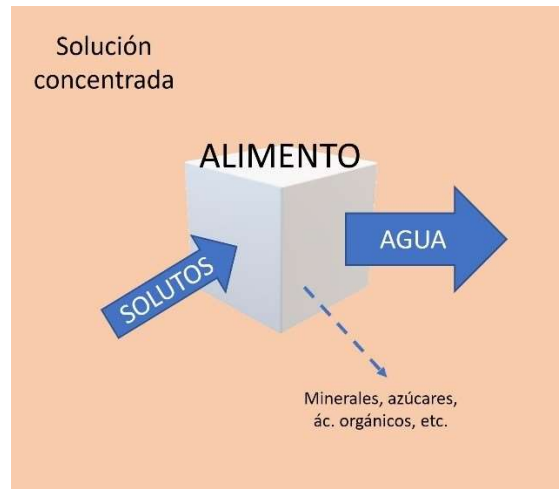


Figura 1.13. Diagrama del proceso de deshidratación osmótica. Adaptado de:Yadav & Singh 2012.

Dentro de los factores principales que influyen en la efectividad de la deshidratación se encuentran la concentración, temperatura y agitación de la solución osmótica; propiedades de los solutos, tiempo y condiciones del proceso; el tipo, forma, tamaño y composición química de la materia prima sujeta a deshidratación osmótica; la relación de la solución a la materia prima; etc. Algunos de los solutos mayormente utilizados en la solución osmótica son azúcares (glucosa, fructosa, sorbitol, jarabe de maíz y sacarosa) o sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio, etc.) (Kurozawa et al., 2017). Respecto a los niveles de deshidratación obtenidos al usar azúcares o sales son variados, esto depende de las condiciones de proceso como la concentración de soluto osmótico. Se

ha reportado que al utilizar sales como cloruro de sodio se obtienen valores de pérdida de humedad más altos que utilizando azúcares como sacarosa (Kurozawa et al., 2017). Dada la naturaleza del proceso de deshidratación osmótica, el contenido de humedad que se obtiene no es tan bajo como para ser comercializado debido a su baja estabilidad. Por lo tanto, los productos deben someterse a algún método adicional como secado con aire caliente, congelación o vacío para que sea considerado como comercialmente estable (Prosapio & Norton, 2017), lo cual permite, aumentar la vida útil y mejorar las características sensoriales de los productos tratados (Ahmed et al., 2016). Asimismo, al incorporar los sólidos bajo esta metodología no es necesaria una inversión costosa en cuanto a equipos, así como del uso de sustancias de origen natural y de fácil adquisición en el mercado.

## **1.6. Proceso de freído como proceso posterior a DO/impregnación**

El freído es un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa el cual se define como la inmersión de un producto alimenticio en aceite comestible calentado a una temperatura por arriba del punto de ebullición del agua usualmente 150 a 200°C (Safari et al., 2018). A esas temperaturas los alimentos adquieren sabores, colores y texturas únicas debido a la pérdida de humedad, absorción de aceite formación de corteza, oxidación de lípidos, gelatinización del almidón y la reacción de Maillard por lo que son atractivos para los consumidores. La transferencia de calor se da por convección entre el aceite y la superficie del alimento y por conducción dentro del alimento (Sahin & Sumnu, 2009). La hidrofobicidad característica del alimento se pierde a medida que se desarrolla la corteza, lo que resulta en una mayor tasa de absorción de aceite. El

aceite entra en los poros provocado por la pérdida de humedad, principalmente durante la etapa de enfriamiento. Además, se puede observar un encogimiento durante la fritura (Sahin & Sumnu, 2009).

En cuanto al proceso de transferencia de calor la fritura profunda se divide en cuatro etapas, la primera de las cuales es el calentamiento inicial a partir de la inmersión de la muestra en el aceite que dura hasta que la temperatura de la superficie alcanza el punto de ebullición del agua. En esta etapa, la transferencia de calor ocurre principalmente por convección libre. La segunda etapa se llama superficie de ebullición, en la que aparecen burbujas de vapor de agua, lo que produce turbulencia en el aceite circundante y cambia la transferencia externa de calor de la convección libre a la forzada. En la tercera etapa, es decir, la tasa de caída, la temperatura en el interior del producto aumenta hasta el punto de ebullición, se forma la corteza y se espesa lo que reduce la tasa de pérdida de humedad y de burbujeo. Además, existe una gran variedad de cambios químicos como la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas. La última etapa, es decir, el punto final de la burbuja, incluye el resto del proceso, en el que ya no se observa la aparición de burbujas o vapor. Estas cuatro etapas se clasifican en general en dos fases de ebullición (la segunda y tercera etapas) y fases de no ebullición (la primera y cuarta etapas) (Safari et al., 2018).

Los productos fritos son muy populares alrededor del mundo, dadas su sabor agradable y características crujientes aunado a que es un proceso simple. Sin embargo, el consumo excesivo de este tipo de alimentos puede desencadenar problemas a la salud como diabetes, enfermedades cardiovasculares y obesidad. Por lo que recientemente diversos investigadores han desarrollado nuevos productos bajos en grasa para mantener el sabor y la textura ideal de los alimentos fritos.

En la Tabla 1.6 se muestran algunos productos vegetales que han sido sometidos a

fritura, así como algunos parámetros importantes de proceso.

Tabla 1.6. Productos sometidos a proceso de fritura.

Producto	Condiciones*	Nivel de absorción de aceite y humedad	Referencia
Papa	Freído por inmersión 12, 150, 180°C; discos de grosor 2.5 mm y diámetro 37mm	$0.2971 \pm 0.0025$ – $0.5166 \pm 0.0166$ g de aceite/g sólidos secos; humedad = 1.8g /100g b.h.	Moyano & Pedreschi (2006)
Chips de camote morado	Freído al vacío (FV), FV asistido con ultrasonido (US), FV-US y microondas (MO) $T = 90^\circ\text{C}$ ; $P = 10$ kPa; $pMO = 0, 300, 600$ W; $pUS = 0, 300, 600$ W; $t_{FV} = 2$ -16 min; $t_{FV-US} = 2$ -16 min; $t_{FVMO} = 2$ -10 min; $t_{FV-US-MO} = 2$ -10 min; Rebanada diámetro= $30 \pm 1$ mm; grosor= $4 \pm 0.2$ mm	$6.90 \pm 0.051$ – $10.57 \pm 1.10$ g de aceite/100g de sólidos; humedad = 4 g de agua /g totales	Su et al. (2018)
Zanahoria	Fritura por inmersión $170^\circ\text{C}$ ; 2,3,4 min; gomaz: guar y xantana; prismas de $60\text{mm} \times 30\text{mm} \times 2.7\text{mm}$ ;	7.8–16.6 % de aceite	Akdeniz et al. (2006)
Chips de plátano macho	Fritura por inmersión $180^\circ\text{C}$ ; 3 min; discos de grosor 2mm	$369.6 \pm 40.8$ – $424.4 \pm 18.7$ g/kg; humedad = $20.4 \pm 3.5$ – $75.2 \pm 9.2$ g/kg	Ammawath et al. (2001)
Chips Taro	Fritura por inmersión 180, 200 °C; 1, 3 min; discos de grosor 1.2mm	$0.1072 \pm 0.0029$ – $0.7145 \pm 0.0908$ kg de aceite/ kg b.s.; humedad = $68.54 \pm 0.41$ – $65.86 \pm 0.45$ g de agua /100g	Paz-Gamboa et al. (2015)

\*PSP = proporción de aceite a producto

### 1.6.1. Freído con aire caliente

Recientemente, se desarrollaron nuevos métodos para reducir el contenido de aceite de los alimentos fritos, en comparación con el microondas y la fritura a baja presión, la fritura al aire es un mejor método para mantener la calidad y seguridad de los alimentos. En los últimos años, la fritura al aire caliente ha surgido como un proceso alternativo para producir alimentos fritos con una pequeña cantidad de aceite (Santos et al., 2017; Song et al., 2020).

La fritura al aire es una técnica alternativa para deshidratar productos alimenticios con aire caliente y gotas de aceite en la cámara de fritura en lugar de aceite caliente, típicamente se logran alimentos fritos en costra con muy bajo contenido de grasa (Andrés et al., 2012; Teruel et al., 2015) (Figura 1.14).

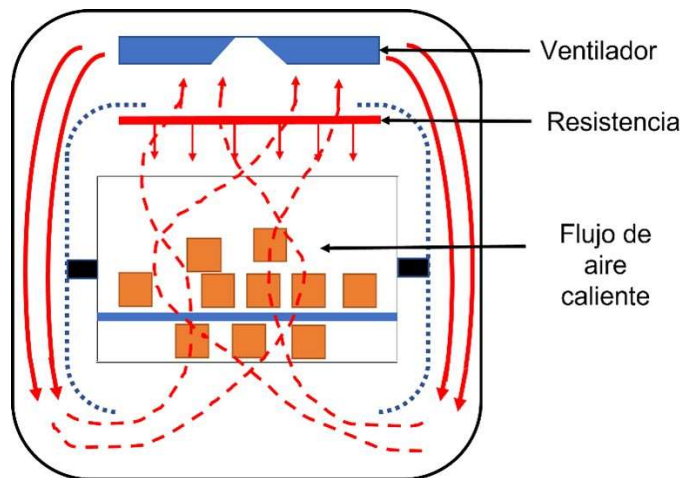


Figura 1.14. Diagrama esquemático del sistema de fritura con aire caliente. Fuente: apds.nl.

De esta forma el producto se deshidrata gradualmente mientras aparece la costra típica de los productos fritos (Ghaitaranpour et al., 2018). Algunas ventajas que ofrece el freír con aire caliente son la reducción de absorción de aceite, ayuda a mantener las vitaminas solubles en aceite, mejora la calidad del producto debido a problemas

de deterioro del aceite, reducción de la emisión de contaminantes al medio ambiente y ahorro energético (Ghaitaranpour et al., 2018; Zaghi et al., 2019). Se ha aceptado gradualmente como un nuevo método de fritura debido a su menor tiempo de cocción y menos calorías (Fabre et al., 2018). Aunado a esto, la fritura al aire imparte las características similares del producto frito tradicional con una absorción de grasa sustancialmente menor, por lo que podría usarse como un método de fritura relativamente saludable (Tian et al., 2017). Además, la fritura al aire tiene efectos diferentes en el color, la textura y el sabor de los alimentos en comparación con la fritura tradicional debido a la oxidación del aceite (Joshy et al., 2020).

### **1.6.2. Modelos de transferencia de masa**

De acuerdo con de Farias Aires et al. (2017) la aplicación de modelos de difusión en procesos de deshidratación osmótica han sido utilizados con frecuencia bajo diferentes parámetros de proceso y alimentos (frutas, verduras, carne y pescado). Estos modelos se pueden clasificar como empíricos y semi-empíricos, mecanicistas y fenomenológicos. Los modelos empíricos y semi-empíricos correlacionan las variables del proceso con la pérdida de agua ( $PA$ ) y la ganancia de sólidos ( $GS$ ), sin tener en cuenta los fenómenos de transporte simultáneos subyacentes de agua y solutos, por lo que se han desarrollado modelos mecanicistas, los cuales toman en cuenta la estructura y/o los enfoques macroscópicos y microscópicos de los productos deshidratados osmóticamente. Por su parte, los modelos fenomenológicos hacen uso de los fenómenos mecánicos que suceden durante el proceso de deshidratación, así como de geometrías clásicas (Assis et al., 2016).

### 1.6.2.1. Modelo de difusión

El modelo de difusión se describe como un modelo fenomenológico principalmente utilizado en procesos a presión atmosférica y geometrías clásicas con diversas condiciones iniciales (Assis et al., 2016; Ochoa-Martínez et al., 2007). El modelo consiste en una solución analítica o numérica de la ley de Fick en estado no estacionario, donde se estima la difusividad efectiva ( $D_w$ ) del agua y del soluto ( $D_s$ ) simulando datos experimentales bajo condiciones límites (Ochoa-Martínez & Ayala-Aponte, 2005). Es importante determinar la difusividad efectiva, puesto que esta explica de forma simultánea tanto la variación de las propiedades físicas del tejido como la influencia de las características de la disolución y las demás variables de proceso (Ochoa-Martínez & Ayala-Aponte, 2005).

A continuación se presentan las diferentes soluciones del modelo de difusión para placa plana infinita, cilindro infinito y esfera (Crank, 1975).

- Placa plana infinita

$$\Psi = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \tau\right) \quad (1.1)$$

- Cilindro infinito

$$\Psi = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\lambda_n^2} \exp(-\lambda_n^2 \tau) \right) \quad (1.2)$$

- Esfera

$$\Psi = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 \tau) \right) \quad (1.3)$$

donde  $\Psi$  es la concentración adimensional y  $\tau$  es el número de Fourier de transporte de masa. En la Tabla 1.7 se muestran algunos estudios realizados para evaluar la adecuación del modelo difusional.

Tabla 1.7. Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de difusional.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencias
Castaña	25, 35, 45°C; 0.5-24 h; producto completo; NaCl (17-16.6%)	0.09-0.14 kg agua/kg producto fresco; 0.07-0.09 kg soluto/kg producto fresco	Chenlo et al. (2006)
Betabel	30-60°C; 30- 240 min; prismas de 10×10×3mm <sup>3</sup> ; NaCl (25%) + sacarosa (55-75 °Bx); PSP 4:1 p/v	33.4 g agua/100g producto fresco; 6.7 g soluto/100g producto	Kaur & Singh (2013)
Ejote	30, 40, 50°C; 6 h; cilindro de diámetro= 8 mm y largo= 6 cm; NaCl (10, 20, 26.7%); PSP 20:1 p/p	16.1-32.4 g agua/100g producto fresco; 6.5-12.5g soluto/100g de producto fresco	Souraki et al. (2012)
Champiñón	40, 60, 80°C; 5-300 min; rebanada de grosor = 1mm; NaCl (0.10, 0.25%); PSP 15:1 p/p	0.32-0.59 g agua/100g producto fresco; 0.02-0.12 g soluto /100g producto fresco	González-Pérez et al. (2019)

\*PSP = proporción de solución a producto

### 1.6.2.2. Modelos de superficie de respuesta

Los modelos de superficie respuesta surgen de la metodología de superficie de respuesta, la cual asume que existe una función polinomial de segundo orden que relaciona las respuestas con las variables independientes (Ecuación 1.4 ) (Soares de Mendonça et al., 2015).

$$Y_k = \beta_{ko} + \sum_{i=1}^3 \beta_{ki}x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{kii}x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1+1}^3 \beta_{kij}x_ix_j \quad (1.4)$$

donde  $Y_k$  es la respuesta (pérdida de agua o ganancia de soluto),  $\beta_{ko}, \beta_{ki}, \beta_{kii}$  y  $\beta_{kij}$  son coeficientes constantes,  $x_i$  y  $x_j$  son las variables independientes codificadas que están linealmente relacionadas con los factores como temperatura de la solución osmótica, concentración o duración de proceso de DO (Bchir et al., 2020; Patil et al., 2014).

Los modelos de superficie de respuesta generalmente se emplean para mapear la respuesta sobre una región de interés particular, optimizar la respuesta o para seleccionar condiciones de operación (Eren & Kaymak-Ertekin, 2007). En particular este tipo de modelo se ha aplicado en procesos de deshidratación osmótica de algunas frutas y verduras (Alam et al., 2010; Azarpazhooh & Ramaswamy, 2011; Bchir et al., 2020; Delgado et al., 2018; Derossi et al., 2015; Eren & Kaymak-Ertekin, 2007; Herman-Lara et al., 2013; Patil et al., 2014; Ruiz-López et al., 2011; Soares de Mendonça et al., 2015). Generalmente se estudian tres factores temperatura, tiempo y concentración osmótica (Eren & Kaymak-Ertekin, 2007; Patil et al., 2014) (Tabla 1.8). Para visualizar los efectos de variar parámetros de procesamiento en la respuesta, se gráfica la ecuación polinomial ajustada, dando como resultado un gráfico de superficie el cual hace evidente en qué dirección aumenta o disminuye la respuesta.

Tabla 1.8. Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de superficie respuesta.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencias
Castaña	20–70 °C; 0.8-9.2 h; sacarosa (53–87% p/v); rebanada 4–6 mm de grosor; PSP 10:1	2.8–31.2 g agua/g producto fresco; 2.5–6.5 g soluto /g producto fresco	Delgado et al. (2018)
Granada	30, 40, 50°C; 240 min; sacarosa (30, 60°Bx); PSP 4:1 p/p	18–31 g agua/100g producto fresco; 2.8–4.2 g soluto / 100g producto fresco	Bchir et al. (2020)
Yacon	Xilitol y sorbitol (20–60°Brix); 0-40 min; prismas de 2.0 ×2.0 ×0.5 cm; PSP 10:1 p/p	49–51 g agua/100 g producto fresco; 1.9–3.4 g soluto/ 100g producto fresco	Soares de Mendonça et al. (2015)
Sapota	40–60°C; 120–240 min; sacarosa (40–60°Bx); PSP 5:1	0.28 g agua/100g producto fresco; 0.08 g soluto/100g producto fresco	Patil et al. (2014)

\*PSP = proporción de solución a producto

### 1.6.2.3. Modelo de Azuara

El modelo de Azuara se describe como un modelo empírico que utiliza datos experimentales de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en un proceso de deshidratación osmótica el cual requiere de ciertos parámetros ajustables. Partiendo del balance de materia como se observa en la siguiente expresión para el caso del agua perdida (Azuara

et al., 1992; Ochoa-Martinez et al., 2007):

$$PA = PA_{\infty} - M_m^w \quad (1.5)$$

donde  $M_m^w$  es la masa de agua capaz de difundirse pero que permanece en la matriz alimenticia en un tiempo  $t$ . Si se considera que la temperatura y la concentración de la solución osmótica permanecen constantes, la pérdida de agua es función de la cantidad de agua que se difunde, por lo tanto,

$$PA = s_1 t M_m^w \quad (1.6)$$

Al sustituir la Ecuación (1.6) en (1.5) y reordenando los términos:

$$PA = \frac{s_1 t PA_{\infty}}{1 + s_1 t} \quad (1.7)$$

donde  $PA$  la pérdida de humedad,  $PA_{\infty}$  es la pérdida de humedad en el equilibrio y  $s_1$  es la constante relacionada con la velocidad de difusión del agua fuera del alimento.

Una expresión similar se puede obtener para la ganancia de sólidos siguiendo el mismo procedimiento:

$$GS = \frac{s_2 t GS_{\infty}}{1 + s_2 t} \quad (1.8)$$

donde  $GS$  la ganancia de sólidos,  $GS_{\infty}$  es la ganancia de sólidos en el equilibrio y  $s_2$  es la constante relacionada con la velocidad de difusión del agua fuera del alimento.

En la Tabla 1.9 se muestran algunos estudios realizados para evaluar la adecuación del modelo de Azuara.

Tabla 1.9. Productos deshidratados osmóticamente modelados modelados con el modelo de Azuara.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencia
Manzana	45, 55 y 60°C; 10-540 min; cubos de 10mm <sup>3</sup> ; miel:azúcar (100:5, 100:10 y 100:15 v/p); PSP 3:1 p/p	55-65 g agua/100g producto fresco; 10-20 g soluto/100g producto fresco	Kamboh et al. (2017)
Guayaba	30, 40, 50°C; 240 min; cubos de 20±2mm <sup>3</sup> ; sacarosa (30, 40, 50 %); PSP 10:1 p/p	0.25-0.35 g agua/100g producto fresco; 0.04-0.07 g soluto/100g producto fresco	Ganjloo et al. (2012)
Calabaza	5, 27.5 y 50°C; 60, 120 y 180 min; prismas de 10×10×5mm <sup>3</sup> ; sacarosa (50 %)+NaCl (5-15 %); PSP 20:1 p/p	50.0-76.7 g agua/100g producto fresco; 6.3-26.0 g soluto/100g producto fresco	Mokhtarian et al. (2014)
Tomate cherry	30 y 40°C; 30-360min; producto completo diámetro = 2.2cm; NaCl y NaCl+sacarosa (10, 25 %); PSP 10:1 p/p	7.2-16.8 g agua /100 g de producto fresco; 4.2-8.4 g soluto/100g producto fresco	Moreira Azoubel & Murr (2004)

\*PSP = proporción de solución a producto

**1.6.2.4. Modelo de Peleg**

Peleg (1988) propuso unas ecuaciones, las cual describen las curvas de pérdida de agua y ganancia de sólidos haciendo uso de los parámetros  $k_1$  y  $k_2$ :

$$PA = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1.9)$$

La constante  $k_0$  se refiere al valor inicial de la transferencia de masa ( $t = t_0$ ) y la constante  $k_1$  se refiere al valor mínimo alcanzable de humedad. Para determinar los valores de  $k_1$  y  $k_2$  se linealiza la Ecuación (1.9) (Ochoa-Martinez et al., 2007).

$$\frac{t}{PA} = k_0 + k_1 t \quad (1.10)$$

En la Tabla 1.10 se muestran algunos estudios realizados para evaluar la adecuación del modelo de Peleg.

Tabla 1.10. Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Peleg.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencias
Chabacano	30, 40, 50, 60°C; 0.5- 6 h; prismas de grosor = 10 mm; sacarosa (50, 60, 70%); PSP 5:1, 10:1, 15:1 p/p	0.5-1.7 g agua/100g producto fresco; 0.23-0.42 g soluto/100g producto fresco	Khoyi & Hesar (2007)
Kiwi	30, 50°C; 10-180 min; sacarosa, maltitol, xilitol; PSP 4:1 p/p	0.33-1.5 g agua/100g producto fresco; 0.15-0.49 g soluto/100g producto fresco	Bialik et al. (2018)
Melón	25-45°C; 30- 1440 min; prismas de 30×40×50 cm; jarabe de maíz (34-66%) y sacarosa (29-57); PSP 10:1 p/p	0.4 - 0.6 g agua/100 g producto fresco; 0.06-0.21 g soluto/100g de producto	Barbosa Júnior et al. (2013)

\*PSP = proporción de solución a producto

### 1.6.2.5. Modelo de Page

El modelo empírico de Page se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{PA}{PA_{\infty}} = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1.11)$$

donde  $k$  es la constante de deshidratación y  $n$  es el parámetro de Page. El modelo también puede ser utilizado para describir el proceso de ganancia de sólidos. En la Tabla 1.11 se muestran algunos estudios realizados para evaluar la adecuación del modelo de Page.

Tabla 1.11. Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Page.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencia
Granada	35, 45, 55°C; 240 min; sacarosa (40, 50, 60 °Bx); PSP 4:1	39.5–72.5 g agua/100g producto fresco; 2.9–11.28 g soluto/100g producto fresco	Mundada et al. (2011)
Manzana	25, 40, 60°C; 4 h; cubos de 12×12×12 mm; sacarosa, sorbitol (60°Bx); PSP 4:1, 10:1 p/p	0.56–0.61 g agua/g producto fresco; 0.09–0.13 g soluto/100g producto fresco	Assis et al. (2017)

\*PSP = proporción de solución a producto

#### 1.6.2.6. Modelo de Magee

Es un modelo empírico resultado de la modificación realizada por Magee del modelo propuesto por Hawkes y Flink (1978) (Ecuación 1.12).

$$PA = kt^{0.5} + k_0 \quad (1.12)$$

donde  $k$  constante de cinética de difusión y  $k_0$  es el parámetro que cuantifica la ganancia o pérdida de masa que ocurre después de tiempos cortos de deshidratación osmótica.

En la Tabla 1.12 se muestran algunos estudios realizados para evaluar la adecuación del modelo de Magee.

Tabla 1.12. Productos deshidratados osmóticamente modelados con el modelo de Magee.

Producto	Condiciones*	Niveles de deshidratación e impregnación	Referencias
Zanahoria	35, 45, 55°C; 240 min; cubos 1×1×1 cm; sacarosa-NaCl (50°Bx+5%;50°Bx+10%;50°Bx+15%); PSP 4:1, 5:1, 6:1	19.2–30.0g/100g producto fresco; 11.8–15.8 g/100g de producto fresco	Singh et al. (2007)
Calabaza, kiwi y pera	30°C; 24 h; discos de calabaza con grosor =10 mm y diámetro =35 mm, medios discos de kiwi y pera con diámetro =50, 60 mm; sacarosa (20–60°Bx); PSP 10:1, 13:1	0.4346–2.7070 g/100g de producto; 0.0860–0.1751 g/100g de producto	Arballo et al. (2012)

\*PSP = proporción de solución a producto

### 1.6.3. Incorporación de compuestos antioxidantes a matrices alimenticias

La incorporación de compuestos antioxidantes mediante deshidratación osmótica (al vacío o presión atmosférica) es una de las formas más viables actualmente utilizadas, debido se ha observado que los compuestos antioxidantes han sido incorporados con éxito al usar matrices de origen vegetal (Aguirre-García et al., 2020; Deng et al., 2019; Dincer, 2021). Esto es debido a que los tejidos vegetales están compuestos por sistemas multifásicos con una microestructura interna formada por células, espacios, capilares y

poros. Dado que el principal tipo de tejido es el parénquima, lugar donde se almacenan los nutrientes importantes para el hombre, este puede alojar una cantidad importante de aire lo cual incide sobre los procesos de impregnación (Castelló et al., 2010; Pissarra et al., 2019). Algunas estimaciones del espacio de aire en el tejido parenquimatoso se encuentran para manzana del 20-25 % del volumen total, 15 % en durazno, 37-45 % en seta y el 1 % en papa (Permadi & Nugroho, 2019; Pissarra et al., 2019; Wang et al., 2020). Durante la impregnación a presión atmosférica, la célula vegetal actúa como una membrana semipermeable por donde el componente bioactivo es transferido desde la solución concentrada a la célula por un proceso de difusión. Este tipo de tratamiento deshidrata parcialmente al alimento sin alterar la estructura natural (Adsare et al., 2016). Algunos de los factores importantes para la viabilidad de la impregnación de matrices vegetales son las cinéticas de fortificación, la viabilidad de algunos compuestos activos para ser utilizados en los alimentos y las interacciones entre los solutos y la matriz, la estructura celular y las propiedades mecánicas de los tejidos (Alzamora et al., 2005). En la tabla 1.13 se presentan otros trabajos reportados sobre impregnación en matrices.

Tabla 1.13. Trabajos sobre incorporación de compuestos bioactivos en matrices alimenticias.

Producto	Condiciones de impregnación*	Niveles de impregnación	Referencia
Dulce grosella espinosa india	Sacarosa + antocianinas (10 y 20%+ extracto), 4 h; sacarosa (30–70°Bx), 24 h; PSP 5:1 v/v	3.05 mg antocianinas/100g producto	Adsare et al. (2016)
Manzana	Quitosano (0.5, 1, 2, 4%), ácido ascórbico (1 %); 24h; cubos de 1,2×1.2×1.2 cm; impregnación con alta presión (100–600MPa)	0.18–0.23kg quitosano/kg producto; 17.32 ± 1.14–32.96 ± 1.22 mgAA/g producto	(Vatankhah & Ramaswamy, 2019)
Manzana	Jugo de mandarina inoculado con trehalosa (10 y 20%) y <i>Lactobacillus salivarius</i> spp. salivarius y homogenización subletal (25–150 MPa)	0.72–0.82 mg GAE/ml 0.466–0.93 mg QE/ ml 0.77–0.80 mg TE/ml 1.6–1.39 mg DPPH <sub>red</sub> /ml	Barrera et al. (2019)
Corteza de sandía	Sacarosa-antocianinas: (30–70 °Bx+ extracto); 4 h; cubos de 10 mm <sup>3</sup> ; IV/US 20 kPa; PSP 5:1; sacarosa (30–70 °Bx)	24–32 mg antocianinas/100g	Bellary et al. (2016)
Plátano	NaCl(10%) +curcuminoides (0.5 g/100 ml); 5 h; Impregnación al vacío: 20kPa; 30 min Ultrasonido: 35 kHz;t =5-25 min; discos grosor =30 mm y diámetro = 2 mm; PSP 5:1	10–95 mg curcuminoides/100g	Bellary & Rastogi (2014)

\*PSP = proporción de solución a producto

Continua Tabla 1.13

Producto	Condiciones*	Niveles de impregnación	Referencia
Pepino	Infusión de 20 especias 70°C; 2.5h; discos de grosor= 20 mm y diámetro= 2 mm; PSP 10:1 p/p	21.65 ± 0.46–537.68 ± 12.26 g de GAE/kg de producto; 133.37 ± 3.37–5246 ± 39.06 mg TE/kg de producto; 97.62 ± 1.62–2867.93 ± 43.68 mg FeSO <sub>4</sub> ×7H <sub>2</sub> O/kg de producto	Giannakourou et al. (2019)
Manzana	Solución osmótica: jugo de mandarina y piña-uva inoculado ( <i>L. salivarius spp. salivarius</i> y <i>L. acidophilus</i> ) 10 <sup>9</sup> CFU/ml por 1 L; discos de grosor – 5 mm y diámetro = 65 mm; impregnación al vacío: <i>P</i> =Reacción química entre el radical DPPH y la especie antioxidante.50 mBar; <i>t</i> =10 min	9.5 ± 0.2 ×10 <sup>7</sup> CFU/ g producto fresco	Betoret et al. (2012)
Grosella espinosa india	30, 40 50°C; 24h; fructooligosacáridos (FOS)-sacarosa: 70°Bx; PSP 5:1 p/v	1.20–17.47 g FOS /kg; 20–33.5 µg GAE/mg muestra seca; 6.0–11.6 µg QE/mg muestra seca	Nambiar et al. (2016)
Calabaza y manzana	Impregnación con microencapsulados de hierro y carotenoides; cilindros de diámetro = 1.5 cm y largo – 1 cm (calabaza); cilindros de diámetro –1.5 cm y largo =1 cm (calabaza); mitad de rebanada de grosor = 0.2 cm (manzana); US (30 min)	24–33% de Fe base seca; 10–30 µg carotenoides/g producto seco	Rojas et al. (2019)

\*PSP = proporción de solución a producto

Continua Tabla 1.13

Producto	Condiciones*	Niveles de impregnación	Referencia
Manzana	25°C; 120 min; solución de $\beta$ -caroteno (0.1 g/ml); prismas de 5.0 cm $\times$ 5.0 cm $\times$ 0.3 cm;	2.8-4.1 mg $\beta$ -caroteno/g sólido seco	Santacruz-Vázquez & Santacruz-Vázquez (2015)
Mango	Oleoresina de gengibre-sacarosa (7.5, 15 y 25 °Bx); sacarosa (30-70°Bx); 24 h; PSP 5:1	4.42 $\pm$ 0.12 mg gengiroles/100g de producto	Shukla et al. (2019)
Manzana	Quitosano (0.5, 1, 2, 4%); ácido ascórbico (1%); 24 h; cubos de 1.2 cm $\times$ 1.2 cm $\times$ 1.2 cm; impregnación con alta presión (100–600 MPa)	0.18–0.23 kg quitosano /kg producto; 17.32 $\pm$ 1.14–37.96 $\pm$ 1.22 mg AA/ g producto	Vatankhah & Ramaswamy (2019)
Manzana	Solución de manitol (0.2 M), lactato de calcio (3%), ácido láctico (3%) y concentrado de zanahoria negra (0.8%); discos de grosor 6.14 mm, diámetro externo 62.37 mm y diámetro interno 20.26 mm; impregnación al vacío asistida (211 mmHg) con ultrasonido (96, 130 y 158 W); 3 y 20 min	53.85–61.75 mg Ca/100g producto; 589.9 $\pm$ 35.1– 652.4 $\pm$ 17.7 mg/100g producto seco; 274.4 $\pm$ 18.9–324.3 $\pm$ 14.9 mg QE/100g producto seco; 18.7 $\pm$ 1.9–22.5 $\pm$ 1.3 mg antocianinas/100g producto seco; 81.7 $\pm$ 7.2– 96.2 $\pm$ 17.3 mg AA/100g producto seco	Yilmaz & Bilek (2018)

\*PSP – proporción de solución a producto

## **1.7. Síntesis de antecedentes**

Uno de los procesos mayormente reportados para incorporar y aprovechamiento de los compuestos bioactivos presentes de forma natural en productos vegetales, es mediante la impregnación/deshidratación osmótica. Sin embargo, pocos autores se han enfocado en estudiar sus fenómenos de transferencia de masa. Respecto al proceso de fritura, de igual forma, existen pocos trabajos sobre transferencia de masa y/o calor que reporten el uso de pretratamiento por impregnación de compuestos bioactivos y deshidratación osmótica con la finalidad de reducir el contenido de humedad lo cual se verá reflejado en una baja absorción de aceite, aunado a un aumento de compuestos bioactivos al final de los procesos de deshidratación. Por lo tanto, en el presente trabajo se pretende realizar un análisis de transferencia de masa y calor al utilizar la impregnación de compuestos bioactivos obtenidos de una solución de flor de Jamaica antes del proceso de freído con la finalidad de lograr la retención de los compuestos bioactivos.

## **1.8. Objetivos del trabajo**

### **1.8.1. Objetivo general**

Analizar la impregregnacion asistida por deshidrtacion osmótica de compuestos antioxidantes de una extracto de flor deJamica en matrices vegetales.

### **1.8.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de las condiciones de impregnación (temperatura, concentración y soluto) sobre las variables de proceso (pérdida de agua, ganancia de soluto)

osmótico y compuestos bioactivos).

- Modelar y las variables de proceso (pérdida de agua y ganancia de soluto osmótico y compuestos bioactivos) durante el proceso de impregnación.
- Evaluar el efecto de las condiciones de la fritura por aire caliente (pretratamiento de la matriz alimenticia y temperatura) sobre la degradación de compuestos bioactivos impregnados en la matriz vegetal.

## II. Metodología

### 2.1. Caracterización fisicoquímica de las materias primas

Las materias primas se caracterizaron en términos del pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez total (AT). Se pesaron cinco gramos de muestra y se homogeneizaron con 10 ml de agua destilada, la mezcla se filtró con papel (papel grado 4) y el extracto resultante se utilizó inmediatamente para los análisis de pH, SST y AT. El pH se determinó con un medidor de pH (UB-10, Denver Instruments, Estados Unidos). Los SST se midieron con un refractómetro (PAL-1, Atago, Tokio, Japón) y se expresaron en grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ). La AT se determinó por titulación con NaOH (0.1 N) y se reportó como porcentaje de ácido cítrico anhidro (g ACA/100 g). La madurez de las frutas frescas se evaluó como la relación entre sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable total (AT). El color de las materias primas y procesadas se caracterizó por medio de la Pantone Color Match Card y el Pantone Connect Software (Pantone, Carlstadt, New Jersey, EE. UU.), este último ejecutado en un iPhone 8 (Apple, Cupertino, California, EE. UU.), reportándose en el espacio de color CIELAB.

### 2.2. Proceso de deshidratación osmótica

#### 2.2.1. Procedimiento experimental

Se adquirieron frutos de papaya (*Carica papaya* cv “Maradol”) de tamaño uniforme y sin daños en un mercado local (Puebla, Pue., México) y se procesaron el mismo

día. Para los experimentos se seleccionaron frutos con un nivel de madurez 3 según la clasificación de color dada por Barragán-Iglesias et al. (2018a). Este nivel de madurez corresponde a frutos fisiológicamente maduros con aproximadamente un 25% de piel de color rojo anaranjado presente en hasta dos franjas. Los frutos de papaya se lavaron con agua del grifo, se desinfectaron (solución acuosa de hipoclorito de sodio, 100 mg/L, 5 min), se pelaron y se cortaron en cubos (1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm). Se seleccionó la geometría del cubo porque esta forma favorece una contracción idéntica (isotrópica) en todas sus dimensiones, a diferencia de otras geometrías como prismas rectangulares o cilindros circulares donde el producto acortaría sus dimensiones en diferentes grados de acuerdo con la tasa de transferencia de masa experimentada (encogimiento anisotrópico), como se ha visto en otros estudios (da Silva Júnior et al., 2016; de Almeida Aires et al., 2018). Las piezas resultantes ( $3.4\pm 0.2$  g) se etiquetaron y se registró individualmente su peso antes de cada experimento de deshidratación osmótica. Los cubos de papaya se colocaron en la solución osmótica (solución acuosa de sacarosa, 50°Bx) prefijada a la temperatura deseada (45, 55 y 65°C) y se mantuvieron sumergidos entre dos placas circulares perforadas de acero inoxidable. Las placas perforadas servían para tres propósitos: (1) eliminar el contacto del alimento osmodeshidratado con el agitador evitando su daño mecánico, (2) mantener el producto perfectamente sumergido en la solución, flotando en caso contrario, y (3) evitar la formación de vórtices en el eje de agitación, lo que también perjudicaría la transferencia de masa. Las placas están dimensionadas para ajustarse al diámetro de vasos de precipitados de vidrio de 5 L y están aseguradas a lo largo de un poste vertical que permite que las paredes del vaso de precipitados permanezcan descubiertas, lo que reduce el daño adicional de la muestra cuando se lanza contra ellas si se usara una jaula de malla de alambre para contener las muestras. El calentamiento y la agitación magnética (a aproximadamente 350

rpm, barras agitadoras magnéticas de 70 mm) del medio osmótico se llevaron a cabo con una parrilla de calentamiento (Cimarec SP131635, Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). En la Figura 2.1 se presenta una vista esquemática de la configuración experimental.

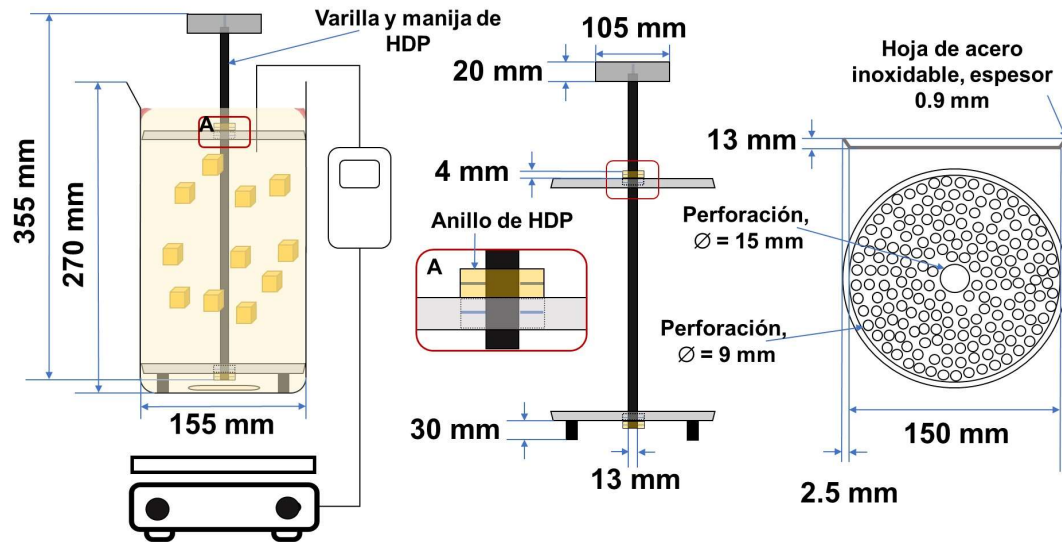


Figura 2.1. Diagrama esquemático de la configuración experimental para la deshidratación osmótica de cubos de papaya.

Se consideró que la temperatura de los cubos de papaya se equilibraba instantáneamente con la del medio osmótico después de su inmersión. En todos los experimentos se utilizó una proporción de masa de solución a producto de 15:1 para evitar una dilución significativa del medio osmótico. Las muestras se retiraron de la solución (sin reemplazo) a diferentes tiempos de inmersión (10, 20, 30, 45, 60, 80, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 y 330 min) y se secaron con toallas de papel para retirar la solución osmótica adherida. El tiempo de impregnación final se estimó a partir de experimentos preliminares de deshidratación osmótica como el que permite observar claramente el comportamiento dinámico y asintótico en las cinéticas de pérdida de agua ( $PA$ ) y ganancia de sólidos ( $GS$ ) en las condiciones experimentales exploradas. Las muestras

de producto se pesaron (AZ214, Sartorius, Goettingen, Alemania), se midieron con un vernier en sus tres ejes (para determinar su volumen) y se determinó su contenido de humedad ( $X_w$ ) mediante secado en horno (FD 23, Binder, Tuttlingen, Alemania) hasta peso constante (105°C). En este estudio, la lixiviación de sólidos del producto durante su procesamiento se consideró insignificante. Finalmente, el cambio de masa en agua ( $j = w$ ) o soluto ( $j = s$ ) por masa de producto inicial se calculó como:

$$\gamma_j = \left| \frac{m_j - m_{j0}}{m_{p0}} \right| = \left| \frac{m_p X_j - m_{p0} X_{j0}}{m_{p0}} \right| \quad (2.1)$$

donde  $m$  es la masa,  $X$  es la fracción másica y los subíndices  $j$ ,  $p$  y  $0$  denotan la sustancia transferida, el producto y el inicio del proceso, respectivamente. Si  $j = w$  entonces  $\gamma_w$  representa la pérdida de agua ( $PA$ ) y si  $j = s$  entonces  $\gamma_s$  es la ganancia de sólidos ( $GS$ ). Estos resultados se utilizaron además para evaluar la reducción de peso ( $WR = PA - GS$ ) y el índice de deshidratación ( $DI = PA/GS$ ).

### 2.2.2. Modelo de deshidratación osmótica desarrollado

El modelo propuesto describe la transferencia de masa por difusión de agua ( $j = w$ ) y soluto ( $j = s$ ) dentro de un producto homogéneo e isotrópico durante un proceso de deshidratación osmótica.

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} = \nabla \cdot (D_j \nabla C_j) \quad (2.2)$$

donde  $C$  es la concentración en fase sólida (expresada como la masa de la sustancia que se difunde por volumen de alimento),  $D$  es la difusividad efectiva de la sustancia transferida y  $t$  es el tiempo.

El intercambio de masa entre las fases sólida y líquida en la superficie del producto

viene dado por

$$-D_j \nabla C_{ji} = k (C_{ji}^* - C_j^*) \quad (2.3)$$

donde  $C^*$  es la concentración de la sustancia transferida en la fase líquida (expresada como la masa de la sustancia que se difunde por volumen de solución),  $k$  es el coeficiente externo de transferencia de masa e  $i$  denota la interfaz alimento-líquido.

Una práctica común es monitorear el proceso de deshidratación osmótica en términos de la pérdida relativa de agua ( $\gamma_w$ ) o ganancia de sólidos, descrita en la Ec. 2.2. La concentración de agua/sólidos está relacionada con su ganancia/pérdida relativa por:

$$C_w = \frac{m_w}{V} = \frac{m_{w0} - m_{p0}\gamma_w}{V} = m_{w0}\phi - m_{p0}\phi\gamma_w \quad (2.4)$$

$$C_s = \frac{m_s}{V} = \frac{m_{s0} - m_{p0}\gamma_s}{V} = m_{s0}\phi + m_{p0}\phi\gamma_s \quad (2.5)$$

donde  $m_{w0}$  y  $m_{s0}$  representan la masa inicial de agua y sólidos en el producto, respectivamente,  $V$  es el volumen instantáneo del producto y  $\phi$  es el recíproco de  $V$  (introducido por conveniencia). A continuación se considera solo la ecuación del balance de masa de agua por simplicidad. La Ec. 2.4 permite el desarrollo del lado izquierdo de la Ec. 2.2 como:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = m_{w0} \frac{\partial \phi}{\partial t} - m_{p0} \frac{\partial (\phi\gamma_w)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Un resultado similar es válido para la derivada espacial,

$$\nabla C_w = m_{w0} \nabla \phi - m_{p0} \nabla (\phi\gamma_w) \quad (2.7)$$

Las derivadas de tiempo y espacio que involucran el producto  $\phi\gamma_j$  ( $j = w, s$ ) se expanden como:

$$\frac{\partial(\phi\gamma_w)}{\partial t} = \phi \frac{\partial\gamma_w}{\partial t} + \gamma_w \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla(\phi\gamma_w) = \phi \nabla\gamma_w + \gamma_w \nabla\phi \quad (2.9)$$

Por lo tanto, las Ecs. 2.6 y 2.7 se convierten en:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = (m_{w0} - m_{p0}\gamma_w) \frac{\partial\phi}{\partial t} - m_{p0}\phi \frac{\partial\gamma_w}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla C_w = (m_{w0} - m_{p0}\gamma_w) \nabla\phi - m_{p0}\phi \nabla\gamma_w \quad (2.11)$$

Al sustituir las Ecs. 2.10 y 2.11 en la ecuación 2.2 se obtiene,

$$(m_{w0} - m_{p0}\gamma_w) \frac{\partial\phi}{\partial t} - m_{p0}\phi \frac{\partial\gamma_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w ((m_{w0} - m_{p0}\gamma_w) \nabla\phi - m_{p0}\phi \nabla\gamma_w)] \quad (2.12)$$

Consideremos ahora que  $\phi$  es una función de la pérdida de agua y ganancia de sólidos promedio en el alimento. Esta es una suposición razonable ya que el encogimiento se determina a partir de mediciones experimentales que involucran a todo el producto. Por lo tanto,  $\phi$  tiene el mismo valor a lo largo de las dimensiones del producto, es decir,

$$\nabla(\phi) = 0 \quad (2.13)$$

Como resultado, la Ec. 2.12 se puede simplificar como:

$$\frac{\partial\gamma_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w \nabla\gamma_w] + \frac{m_{w0} - m_{p0}\gamma_w}{m_{p0}\phi} \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (2.14)$$

El término  $\partial\phi/\partial t$  se puede desarrollar aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_w\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_w\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_s\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_s\rangle}{\partial t} \quad (2.15)$$

donde  $\langle\gamma_w\rangle$  y  $\langle\gamma_s\rangle$  denotan la pérdida de agua y ganancia de sólidos promediados en el volumen del alimento, respectivamente. Los promedios volumétricos se evalúan como:

$$\langle u \rangle = \frac{\int_V u dV}{\int_V dV} \quad (2.16)$$

donde  $u$  es la variable local. De hecho, las cantidades  $\langle\gamma_w\rangle$  y  $\langle\gamma_s\rangle$  son las variables determinadas durante los experimentos de deshidratación osmótica. Finalmente, el modelo de transferencia de masa para la pérdida de agua está dado por:

$$\frac{\partial\gamma_w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_w \nabla \gamma_w) + g_w \quad (2.17)$$

$$g_w = \frac{m_{w0} - m_{p0}\gamma_w}{m_{p0}\phi} \left( \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_w\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_w\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_s\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_s\rangle}{\partial t} \right) \quad (2.18)$$

De manera similar, se obtiene el siguiente modelo para la ganancia de sólidos:

$$\frac{\partial\gamma_s}{\partial t} = \nabla \cdot (D_s \nabla \gamma_s) + g_s \quad (2.19)$$

$$g_s = -\frac{m_{s0} - m_{p0}\gamma_s}{m_{p0}\phi} \left( \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_w\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_w\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial\langle\gamma_s\rangle} \frac{\partial\langle\gamma_s\rangle}{\partial t} \right) \quad (2.20)$$

Ademas de corregir las derivadas de la *PA* y *GS* por el encogimiento del producto, los términos  $g_w$  y  $g_s$  también acoplan las ecuaciones de transferencia de masa. Consideremos que las concentraciones en ambos lados de la interfase sólido-solución están

relacionadas por un coeficiente de partición promedio:

$$C_j^* = \langle K_j \rangle C_j \quad (2.21)$$

donde

$$\langle K_j \rangle = \frac{\int_{C_{j0}}^{C_j^*} (C_j^*/C_j) dC_j}{\int_{C_{j0}}^{C_j^*} dC_j} \quad (2.22)$$

La combinación de las Ecs. 2.3, 2.4 y 2.13 produce,

$$\nabla \gamma_{wi} = -\frac{k \langle K_w \rangle}{D_w} (\gamma_{wi} - \gamma_{we}) \quad (2.23)$$

Una expresión similar se obtiene para la ganancia de sólidos siguiendo el mismo procedimiento,

$$\nabla \gamma_{si} = -\frac{k \langle K_s \rangle}{D_s} (\gamma_{si} - \gamma_{se}) \quad (2.24)$$

### 2.2.3. Solución del modelo

Las Ecs. 2.17 a 2.20 se resolvieron para la geometría cúbica considerando condiciones isotérmicas, coeficientes de difusión constantes y composición constante del medio osmótico. Además, se consideró que la pérdida de agua y ganancia de sólidos en la superficie del producto alcanzaron instantáneamente sus valores de equilibrio, ya que estudios previos han demostrado que la resistencia externa convectiva a la transferencia de masa puede despreciarse incluso en medios osmóticos sin agitación (Pacheco-Angulo et al.,

2016). Las ecuaciones 2.17 a 2.20 se desarrollaron en el sistema coordinado rectangular y se expresaron además como un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias discretizando las derivadas espaciales. Una ventaja adicional de la forma de cubo estudiada es lograr la misma resolución espacial y precisión de integración utilizando el mismo número de nodos ( $N$ ) en todas las direcciones de transferencia de masa. El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias resultante es (para  $j = w, s; P, Q, R = 1, \dots, N$ ):

$$\begin{aligned}
 \frac{d\gamma_{jPQR}}{dt} = & D_j \frac{\gamma_{j(P+1)QR} - 2\gamma_{jPQR} + \gamma_{j(P-1)QR}}{(\Delta x)^2} \\
 & + D_j \frac{\gamma_{jP(Q+1)R} - 2\gamma_{jPQR} + \gamma_{jP(Q-1)R}}{(\Delta y)^2} \\
 & + D_j \frac{\gamma_{jPQ(R+1)} - 2\gamma_{jPQR} + \gamma_{jPQ(R-1)}}{(\Delta z)^2} \\
 & + g_{jPQR}
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Solo se consideró un octavo de la geometría original en la solución debido a la simetría del producto alrededor de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Una de las principales dificultades para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales mostrado en la ecuación Ec. (2.25) que surge del modelo de transferencia de masa acoplada radica en evaluar el término  $g_{jPQR}$ , ya que las derivadas locales temporales del lado izquierdo  $\partial\gamma_j/\partial t$  aparecen en ambos lados de la ecuación:  $g_{jPQR}$  depende de  $\partial\langle\gamma_j\rangle/\partial t$  que a su vez depende de  $\partial\gamma_j/\partial t$ . Por lo tanto, se desarrolló un algoritmo iterativo para evaluar  $g_{jPQR}$  (los índices de los subíndices  $P$ ,  $Q$  y  $R$  se omiten de ahora en adelante por simplicidad). El algoritmo para evaluar el término de acoplamiento  $g_j$  requiere el número de nodos ( $N$ ), los valores locales de la pérdida de agua y ganancia de sólidos ( $\gamma_j$ ), las difusividades del agua y de los sólidos ( $D_j$ ), los pesos iniciales del agua ( $m_{w0}$ ), los sólidos ( $m_{s0}$ ) y el producto ( $m_{p0}$ ), longitud inicial de difusión ( $L_0$ ) y dos tolerancias de convergencia ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ). La

longitud de difusión ( $L$ ), el volumen del producto ( $V$ ), la pérdida de agua y ganancia de sólidos promedio ( $\langle \gamma_j \rangle$ ) se corrigieron inicialmente para el encogimiento y se usaron posteriormente para evaluar tanto  $g_j$  como  $\partial \gamma_j / \partial t$ , como se describe a continuación (el diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Figura 2.2):

1. La longitud característica de difusión se inicializa con su valor inicial ( $L = L_0$ ).
2. Las distancias nodales se evalúan ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = L / (N + 1)$ ) y se utilizan para estimar los promedios de la pérdida de agua ( $\langle \gamma_w \rangle$ ) y ganancia de sólidos ( $\langle \gamma_s \rangle$ ) a partir de los valores locales y la Ec. 2.16.
3. La longitud de difusión se corrige a partir del modelo de encogimiento experimental, es decir,  $L_c = f(\langle \gamma_w \rangle, \langle \gamma_s \rangle)$ , y la diferencia relativa ( $E_1$ ) entre  $L_c$  y  $L$  es evaluada y comparada con la tolerancia preestablecida  $\varepsilon_1$  (0.001 en este estudio).
4. Si  $E_1 > \varepsilon_1$  entonces  $L = L_c$  y los pasos 2 y 3 se repiten, de lo contrario el algoritmo continua con el siguiente paso.
5. Las cantidades de  $\langle \gamma_w \rangle$  y  $\langle \gamma_s \rangle$  se utilizan para obtener  $\partial \phi / \partial \langle \gamma_w \rangle$ ,  $\partial \phi / \partial \langle \gamma_j \rangle$  y  $\phi$  del modelo de encogimiento experimental existente.
6. El término de acoplamiento se inicializa como cero ( $g_j = 0$ ).
7. Las derivadas  $\partial \gamma_j / \partial t$  se calculan con la Ec. 2.25 y se promedian en el volumen resolviendo la Ec. 2.16 para obtener  $\partial \langle \gamma_j \rangle / \partial t$ .
8. El término de acoplamiento corregido  $g_{jc}$  se obtiene con las Ecs. 2.18 y 2.20, y se evalúa la diferencia relativa ( $E_2$ ) entre  $g_{jc}$  y  $g_j$ , y se compara con la tolerancia preestablecida  $\varepsilon_2$  (0.001 en este estudio).

9. Si  $E_2 > \varepsilon_2$  entonces  $g_j = g_{jc}$  y los pasos 7 y 8 se repiten, de lo contrario el algoritmo continua con la integración en el tiempo de las derivadas  $\partial\gamma_j/\partial t$ .

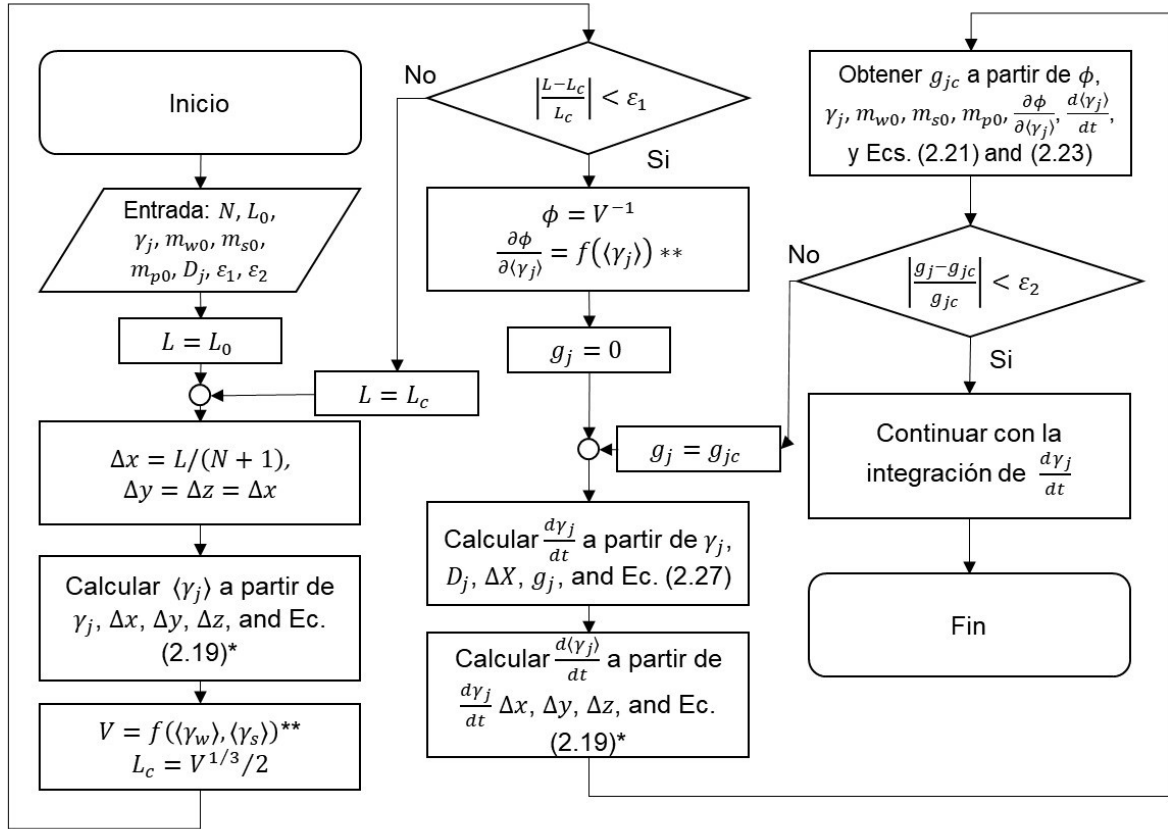


Figura 2.2. Diagrama de flujo del algoritmo para evaluar las derivadas de pérdida de agua y ganancia de soluto con término de acoplamiento. \*Con regla del trapecio. \*\*Con modelo de encogimiento determinado experimentalmente.

La Ec. 2.16 se resolvió mediante la regla del trapecio durante los pasos 2 y 7 del promedio de volumen. Finalmente, el conjunto de derivadas locales corregidas  $\partial\gamma_j/\partial t$  se integró hacia adelante en el tiempo utilizando un método de orden variable basado en las fórmulas de diferenciación numérica (ode15s), adecuado para ecuaciones rígidas, con el software Matlab R2010a (MathWorks Inc., Natick, Ma, EE. UU.). Además, se utilizó la extrapolación de Richardson para aumentar la precisión de la integración del modelo

y evitar el uso de un gran número de nodos durante la estimación de las difusividades de agua y soluto, acelerando la solución iterativa del modelo de deshidratación osmótica durante el procedimiento de regresión no lineal, especialmente cuando las ecuaciones de transferencia de masa de soluto y agua están acopladas. Este método requiere integrar dos conjuntos de ecuaciones diferenciales ordinarias obtenidos con diferentes resoluciones espaciales. En este caso, el modelo de deshidratación osmótica se resolvió con  $N = 10$  (1000 ecuaciones diferenciales ordinarias por sustancia que se difunde) y  $N = 19$  (6859 ecuaciones diferenciales ordinarias por sustancia que se difunde), donde el número de nodos más grande tiene la mitad de la distancia nodal que el número más pequeño. Aquí, tanto la geometría elegida como el mismo número de nodos en todas las direcciones facilita la implementación del método de Richardson. Finalmente, las soluciones promedio de pérdida de agua y ganancia de sólidos obtenidas bajo diferentes resoluciones espaciales se combinaron de acuerdo con:

$$\langle \gamma_j \rangle_{Richardson} = \frac{4}{3} \langle \gamma_j (N = 19) \rangle + \frac{1}{3} \langle \gamma_j (N = 10) \rangle \quad (2.26)$$

#### 2.2.4. Estimación de los coeficientes de difusión

El modelo se utilizó para analizar el efecto de diferentes consideraciones sobre las difusividades estimadas de agua/sólidos y los niveles de equilibrio de deshidratación durante la deshidratación osmótica de cubos de papaya. Las consideraciones de modelado incluyeron: ecuaciones de transferencia de masa acopladas y parcialmente acopladas en un sólido que se contrae (modelos A y B, respectivamente) y ecuaciones de transferencia de masa desacopladas en un sólido rígido (sin encogimiento) con longitud característica de difusión corregida y sin corregir (modelos C y D, respectivamente). En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las características de los modelos.

Tabla 2.1. Descripción de las consideraciones de modelado para estimar los coeficientes de difusión.

Modelo	Consideraciones
A	Ecuaciones de transferencia de masa acopladas en un sólido que se encoge, es decir, $L$ , $g_w$ y $g_s$ se actualizan durante la simulación.
B	Ecuaciones de transferencia de masa parcialmente acopladas en un sólido que se encoge, es decir, $L$ se actualiza durante la simulación mientras que $g_w = g_s = 0$ .
C	Ecuaciones de transferencia de masa desacopladas en un sólido rígido (sin encogimiento) con longitud característica de difusión no corregida, es decir, $L = L_0$ (valor inicial), $g_w = g_s = 0$ .
D	Ecuaciones de transferencia de masa desacopladas en un sólido rígido (sin encogimiento) con longitud característica de difusión corregida, es decir, $L = \langle L_0 \rangle$ (valor promedio), $g_w = g_s = 0$ .

Los parámetros del modelo  $D_w$ ,  $D_s$ ,  $\gamma_{we}$  ( $PA_e$ ) y  $\gamma_{se}$  ( $GS_e$ ) se estimaron simultáneamente en cada temperatura para minimizar la suma de cuadrados de los residuos ( $RSS$ ):

$$RSS = \sum_{k=1}^n \left( PA_{exp,k} - \langle PA \rangle_{mod,k} \right)^2 + \sum_{k=1}^n \left( GS_{exp,k} - \langle GS \rangle_{mod,k} \right)^2 \quad (2.27)$$

donde  $n$  es el número total de experimentos realizados para cada temperatura de deshidratación osmótica y los subíndices  $exp$  y  $mod$  representan un valor experimental o del modelo, respectivamente. En este estudio no se intentó estimar el coeficiente de transferencia de masa externa porque las condiciones actuales de agitación permiten un proceso controlado por difusión y el período dinámico simulado para la transferencia de masa estaría condicionado por efectos de transferencia de masa externa e interna, lo que llevaría a un número infinito de soluciones proporcionando un buen ajuste de los datos experimentales. Además, como las curvas de pérdida de agua y ganancia de sólidos

no muestran una separación amplia entre condiciones sin agitación y bien agitadas, un problema intensificado por la variabilidad experimental intrínseca, la estimación de un coeficiente externo requeriría un montaje experimental diseñado para reducir el número de Biot de transporte de masa, como usar partículas más pequeñas y varias velocidades de agitación o no agitar en absoluto (Pacheco-Angulo et al., 2016). Las cantidades  $\langle PA \rangle$  y  $\langle GS \rangle$  representan los valores promedio para la pérdida de agua y la ganancia de soluto resultantes de la aplicación del método de Richardson (Ec. 2.26). La ecuación 2.27 combina las respuestas de pérdida de agua y ganancia de sólidos porque no pueden obtenerse independientemente una de la otra en los modelos acoplados de transferencia de masa A y B. Por lo tanto, el criterio de aptitud RSS debe incluir ambas variables para evitar que alguna de estas respuestas se ajuste bien a expensas de la otra. Para los modelos de deshidratación osmótica no acoplados C y D, la minimización de los términos involucrados en la Ec. 2.27 se reduce a la de dos índices separados porque el ajuste de las curvas pérdida de agua y ganancia de sólidos no está interrelacionado. La minimización de la Ec. 2.27 comienza proporcionando estimaciones aproximadas de  $D_w$ ,  $D_s$ ,  $\gamma_{we}$  ( $PA_e$ ) y  $\gamma_{se}$  ( $GS_e$ ). Los valores iniciales para  $\gamma_{we}$  y  $\gamma_{se}$  se obtuvieron a partir de una inspección visual de los datos experimentales, mientras que las de  $D_w$  y  $D_s$  se obtuvieron a partir de la pendiente de la gráfica de la transformación logarítmica de PA o GS adimensional contra al tiempo mediante el uso de la solución analítica para transferencia de masa con frontera en equilibrio instantáneo en una geometría de cubo (Estévez-Sánchez et al., 2021). El procedimiento de optimización fue el siguiente: (i) se resuelve el modelo de deshidratación osmótica con las estimaciones disponibles de  $D_w$ ,  $D_s$ ,  $\gamma_{we}$  y  $\gamma_{se}$  como se describe en la sección anterior, (ii) se evalúa el RSS, (iii) se modifican y actualizan los parámetros con el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales de Levenberg-Marquardt, (iv) las iteraciones continúan hasta

que las estimaciones están dentro de la tolerancia de convergencia de RSS ( $1 \times 10^{-8}$  en este estudio).

### **2.2.5. Análisis de datos**

El algoritmo de Levenberg-Marquardt se implementó con la rutina `nlinfit` de Matlab (Matlab R2010a, MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.). La significancia estadística de los parámetros estimados se evaluó a través de sus intervalos de confianza al 95 %, mientras que la calidad de ajuste de los modelos se evaluó con los estadísticos  $R^2$  y la desviación relativa media (*MRD*) entre los resultados experimentales y ajustados.

## **2.3. Proceso de impregnación de compuestos bioactivos**

### **2.3.1. Procedimiento experimental**

#### **2.3.1.1. Materias primas**

Se adquirieron frutos frescos con tamaño uniforme de papaya (*Carica papaya* var. Maradol), piña (*Ananas comosus* L.) y cálices de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) de un mercado local en Puebla, México. Para papaya se utilizaron frutos en el mismo estado de madurez que el descrito en la sección anterior, mientras que para piña se seleccionaron frutos con el 25% de los ojos amarillos desde la base del fruto. Ambos productos se lavaron y secaron; la papaya se cortó en cubos de 15 mm de lado y la piña se rebanó con un cortador de manzanas en octavos que posteriormente se rebanaron con un grosor de 50 mm (Figura 2.3).

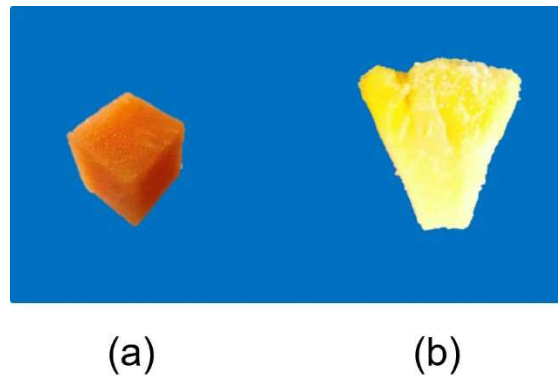


Figura 2.3. Geometrías utilizadas de (a) papaya y (b) piña.

En cuanto a los cálices de Jamaica, fueron enjuagados, escurridos y secados en horno a 55°C durante 12 h (3926TCDB, Excalibur, México) hasta un contenido de humedad de 12.5 kg agua/100 kg producto (actividad de agua de  $0.19 \pm 0.01$ ) (Figura 2.4). La temperatura de secado de los cálices de Jamaica se encuentra en el rango bajo (50-70 °C) según lo informado por otros autores (Chumsri et al., 2008; ?) y se seleccionó para evitar una posible degradación térmica de los compuestos bioactivos, mientras que el contenido de humedad final permitió obtener un polvo fluido no pegajoso ni cohesivo, libre crecimiento microbiano, durante un período de almacenamiento de al menos 90 días.



Figura 2.4. Deshidratado de flores de Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa*).

Los cálices secos se trituraron (GX4100, trituradora Krups, Solingen, Alemania) y se tamizaron a través de un tamiz de malla 80 (180  $\mu\text{m}$ ) (Figura 2.5). El polvo de Jamaica resultante se almacenó en botellas de color ámbar en condiciones de oscuridad a temperatura ambiente hasta su uso.

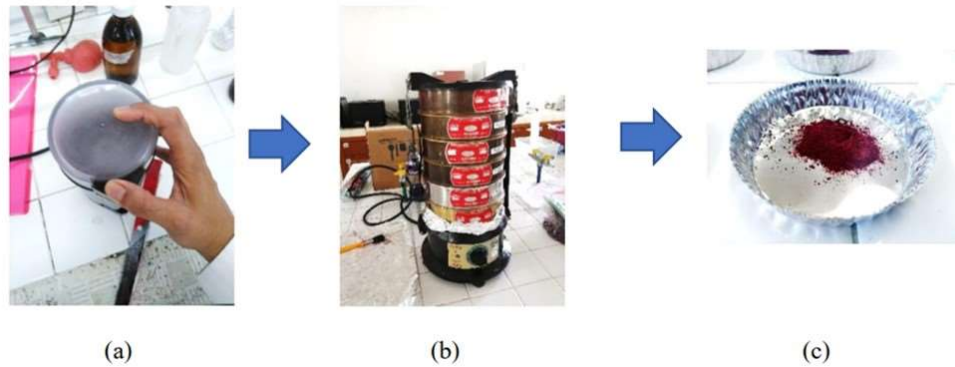


Figura 2.5. Proceso para la obtención del polvo de flor de Jamaica. (a) molido, (b) tamizado y (c) polvo de flor de Jamaica.

### 2.3.1.2. Preparación de la solución de extracto de Jamaica/sacarosa

El extracto se preparó añadiendo el polvo seco de Jamaica en agua destilada a 80°C durante 20 min a 350 rpm (10 ml por gramo de polvo de Jamaica). El extracto de Jamaica (EJ) resultante se filtró y se enfrió con un baño de agua a aproximadamente 5°C por encima de la temperatura de impregnación deseada. Finalmente, se disolvió sacarosa en el extracto para obtener una solución de extracto de Jamaica/sacarosa (SEJS) a 20°Bx para papaya y 30°Bx para piña que se usó inmediatamente como medio de impregnación después de su posterior enfriamiento a la temperatura deseada.

### 2.3.1.3. Experimentos de impregnación

Se llevaron a cabo dos conjuntos de experimentos para caracterizar el procesamiento de los productos impregnados con SEJS. Del primer lote se determinó la pérdida de

agua ( $\Phi_w$ ), la ganancia de sólidos ( $\Phi_s$ ), la reducción de volumen (WR) y el índice de deshidratación (DI), mientras que con el segundo lote se analizaron la impregnación de compuestos bioactivos y los cambios en la capacidad antioxidante. Los experimentos de impregnación se llevaron a cabo por triplicado y las muestras se procesaron como sigue en todos los casos. Se colocaron las piezas (papaya o piña) en la SEJS preestablecida a la temperatura deseada (45, 55 y 65°C), en una relación de masa de 15:1 (Figura 2.1). Las temperaturas de procesamiento se seleccionaron de acuerdo con otros estudios en los que se han osmodeshidratado los frutos propuestos o se ha utilizado extracto de Jamaica como solución de impregnación. Por ejemplo, Barragán-Iglesias et al. (2018b) y Jiménez et al. (2020) osmodeshidrataron rodajas de papaya en el rango de temperatura de 30 a 70 °C con solución de sacarosa y jugo de mora, respectivamente, mientras que Maleki et al. (2019) utilizaron una temperatura de 50°C para impregnar zanahoria con extracto de Jamaica. Se han utilizado valores de temperatura comparables (40-60 °C) al estudiar diferentes soluciones de impregnación y matrices alimentarias como el ñame con antocianinas de mora Grajales-Lagunes et al. (2019).

Las muestras se retiraron del sistema sin reposición a diferentes intervalos (0, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 y 360 min), enseguida se pesaron, midieron con un vernier a lo largo de sus tres ejes y se analizó su contenido de humedad. Los sólidos que se perdieron del producto hacia la solución se consideraron insignificantes. La pérdida de agua ( $k = w$ ) o la ganancia de sólidos ( $k = s$ ) por masa de producto inicial se calculó como

$$\Phi_k = \frac{m_{p0}Y_{k0} - m_{pt}Y_{kt}}{m_{p0}} \quad (2.28)$$

donde la  $m$  es la masa,  $Y$  es la fracción másica y los subíndices  $p$ , 0 y  $t$  denotan el producto, el estado inicial y el tiempo respectivamente. La reducción de peso (WR) y

el índice de deshidratación (DI) se estimaron a partir de  $\Phi_w$  y  $\Phi_s$  como

$$WR = \Phi_w - \Phi_s \quad (2.29)$$

$$DI = \frac{\Phi_w}{\Phi_s} \quad (2.30)$$

El contenido de humedad inicial de las frutas frescas se determinó mediante secado en estufa (FD 23, Binder, Tuttlingen, Alemania) hasta alcanzar peso constante a 105°C.

#### 2.3.1.4. Determinación de compuestos bioactivos

Los compuestos fenólicos totales (CFT), las antocianinas totales (ANT) y la capacidad antioxidante total (CAT) se evaluaron según lo descrito por Gao et al. (2000), Giusti & Wrolstad (2001) y Luna-Guevara et al. (2014), respectivamente. Las muestras procesadas a los diferentes intervalos de tiempo se pesaron y homogeneizaron utilizando una licuadora doméstica con 50 ml de agua destilada durante 1 min y la mezcla resultante se filtró con papel filtro (grado 4). Los extractos se almacenaron en frascos color ámbar a 4°C hasta su uso para realizar la determinación de los CFT, ANT y CAT. Las lecturas de absorbancia requeridas se obtuvieron con un espectrofotómetro UV-Vis (modelo 6405, Jenway, Staffordshire, Reino Unido).

- Compuestos fenólicos totales (CFT). Se mezcló 1 ml del extracto diluido adecuadamente con 1 ml de reactivo de Folin-Ciocalteu (0.1 M) ó 1 ml de agua destilada y se dejó reposar la solución durante 3 min. Posteriormente, se añadió a cada mezcla 1 ml de solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (0.05% P/V). Las soluciones resultantes se incubaron durante 30 min en oscuridad a temperatura ambiente y se registró su absorbancia a 765 nm. Los valores de absorbancia de las mezclas con reactivo de Folin-Ciocalteu ( $A_1$ ) y agua ( $A_2$ ) se utilizaron para evaluar la absor-

bancia real ( $A = A_1 - A_2$ ) del extracto. Finalmente, la CFT en las muestras se estimó con una curva estándar ( $A = m * CFT + b$ ) preparada con soluciones de ácido gálico tratadas de la misma forma que los extractos. Los resultados de CFT se expresaron como mg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/100 g producto fresco.

- Antocianinas totales (ANT). Se utilizó el método diferencial de pH para analizar las antocianinas. Se mezclaron dos extractos de muestra (0.4 ml) con 1.6 ml de soluciones tampón de pH 1 (buffer de KCl 0.025M) ó pH 4,5 (buffer de  $C_2H_3NaO_2$  0.04M). Las mezclas se dejaron reposar en la oscuridad durante 15 min y se registró su absorbancia a 520 y 700 nm. Los resultados de ANT se calcularon como mg de equivalentes de cianidina-3-glucósido (C3G)/100 g producto fresco con la ecuación

$$ANT = 1000 \frac{\left[ (A_{520} - A_{700})_{pH1} - (A_{520} - A_{700})_{pH4.5} \right] M d}{\epsilon l} \quad (2.31)$$

donde  $A$  es la absorbancia,  $M$  es el peso molecular de C3G(484.83g/mol),  $d$  es el factor de dilución (adimensional),  $\epsilon$  es el coeficiente de extinción molar de C3G (26900 L/mol.cm) y  $l$  es longitud de la celda de cuarzo (cm).

- Capacidad antioxidante total (CAT). Se mezcló 1 ml del extracto adecuadamente diluido con 1 ml de solución de DPPH (0.004% P/V) ó 1 ml de agua destilada. Las mezclas se agitaron y se dejaron reposar en la oscuridad a temperatura ambiente durante 30 min. Los valores de absorbancia de las mezclas con reactivo DPPH ( $A_1$ ) y agua ( $A_2$ ) se utilizaron para evaluar la absorbancia real ( $A = A_1 - A_2$ ) del extracto a 517 nm. Al mismo tiempo, se mezcló 1 ml de solución de DPPH (0.004% P/V) con 1 ml de etanol absoluto, se agitó con vortex (FinePCR,

FINEVORTEX, Gyeonggi-do, Korea), se dejó reposar en la oscuridad durante 30 min y se midió su absorbancia a 517 nm ( $A_{DPPH}$ ). Los porcentajes de inhibición ( $I$ ) se estimaron como  $I = (A_{DPPH} - A) / A_{DPPH}$ . Finalmente, el CAT en las muestras se estimó con una curva estándar ( $I = m * CAT + b$ ) preparada con soluciones de Trolox tratadas de la misma forma que los extractos. Los resultados de CAT se expresaron como mg equivalentes de Trolox (TE)/100 g producto fresco.

## 2.3.2. Modelos de impregnación desarrollados

### 2.3.2.1. Cubos de papaya

La impregnación/deshidratación de cubos de papaya se modeló mediante la ecuación de difusión de Fick en estado no estacionario considerando (i) que el material es homogéneo e isotrópico, (ii) la transferencia de masa es tridimensional, (iii) la concentración inicial de la sustancia que se difunde en el alimento es uniforme, (iv) durante la transferencia de masa la resistencia externa es insignificante, (v) las propiedades de la solución de impregnación son constantes (volumen infinito de la fase líquida) y (vi) el proceso es isotérmico. Bajo estos supuestos, el modelo de transferencia de masa para un paralelepípedo general junto con sus condiciones iniciales y de contorno está dado por (Ortiz-García-Carrasco et al., 2015):

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{1}{p_1^2} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_1} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \xi_1} \right) + \frac{1}{p_2^2} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_2} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \xi_2} \right) + \frac{1}{p_3^2} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_3} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \xi_3} \right) \quad (2.32)$$

Dentro del alimento

$$\psi = 1, t = 0 \quad (2.33)$$

En la superficie del alimento:

$$\psi = 0, t > 0 \quad (2.34)$$

donde  $\psi$  es la concentración adimensional,  $\tau$  es el número de Fourier para la transferencia de masa,  $p_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) son parámetros que ajustan la relación de aspecto del cuboide ( $p_1 = p_2 = p_3 = 1$  para un cubo) y  $\xi_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) representa las coordenadas rectangulares adimensionales. Los grupos y variables adimensionales se definen como

$$\psi = \frac{c - c_e}{c_0 - c_e} = \frac{(c - c_0) - (c_e - c_0)}{(c_0 - c_0) - (c_e - c_0)} = \frac{\phi - \phi_e}{-\phi_e} = 1 - \frac{\phi}{\phi_e} \quad (2.35)$$

$$\tau = \frac{Dt}{L_1^2} \quad (2.36)$$

$$\xi_j = \frac{x_j}{L_j} \quad (j = 1, 2, 3), p_1 = 1, p_2 = \frac{L_2}{L_1}, p_3 = \frac{L_3}{L_1} \quad (2.37)$$

donde  $c$  es la cantidad local de la sustancia que se difunde por unidad de volumen de fase sólida (o por unidad de masa del producto si se ignoran los cambios en la densidad),  $\phi$  es la pérdida de agua, la ganancia de soluto o el cambio de concentración neta en la sustancia que se difunde ( $\phi = c - c_0$ ),  $D$  es la difusividad efectiva de la sustancia transferida (agua, soluto osmótico o compuesto bioactivo),  $L$  es la longitud característica para la difusión,  $t$  es el tiempo de procesamiento,  $x_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) representa las coordenadas rectangulares, los subíndices 0 y  $e$  denotan un estado inicial o de equilibrio, respectivamente. La solución analítica promediada en el volumen para el problema de transferencia de masa 3D descrito por las Ecs. (2.32)-(2.34) es ( $j = 1, 2, 3$ ):

$$\Psi = 1 - \frac{\phi}{\phi_e} = \Psi_1 \Psi_2 \Psi_3 \quad (2.38)$$

$$\Psi_j = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \tau}{4 p_j^2}\right) \quad (2.39)$$

Las letras mayúsculas  $\Psi$  y  $\Phi$  denotan los valores promediados en el volumen de sus contrapartes locales  $\psi$  y  $\phi$ , respectivamente. El número de Fourier definido en la Ec. (2.36) implica que la solución analítica descrita por las Ecs. (2.33) y (2.34) solo se aplica a un sólido rígido, es decir, un producto que no cambia de tamaño ni altera sus proporciones durante el proceso. Sin embargo, Ortiz-García-Carrasco et al. (2015) demostraron que la solución a las Ecs. (2.33) a (2.34) también se pueden aplicar para describir la transferencia de masa en un alimento con encogimiento isotrópico, es decir, el escenario donde el sólido se encoge pero los parámetros de relación de aspecto no cambian, una condición fácil de cumplir en un cubo. En este caso,  $L_1$  es una variable independiente del espacio que tiene variación temporal (incluso si no está descrita por una función de tiempo explícita). El número de Fourier que aparece en las Ecs. (2.36) y (2.39) entonces toma la forma:

$$\tau = D \int_0^t \frac{1}{L_1^2} \partial t \quad (2.40)$$

Por lo tanto, el gráfico de  $\Psi$  *versus*  $\tau$  es idéntico para los sólidos rígidos y para los que se encogen isotrópicamente, sin embargo, la dependencia de  $L_1$  con  $t$  establecerá como se ve la solución cuando se gráfica frente a la escala de tiempo real porque la relación entre  $\tau$  y  $t$  ya no es lineal. Esta última relación puede obtenerse resolviendo analíticamente la Ec. (2.40) si  $L_1$  se da como una función explícita del tiempo. Sin embargo, la solución numérica al siguiente problema de valor inicial, que se obtiene reescribiendo la Ec. (2.40), representa una alternativa menos limitada para encontrar la gráfica de  $t$  *versus*  $\tau$  cuando  $L_1$  se da como una función de otras variables de proceso

como  $\Psi$  o  $\Phi$ :

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{L_1^2}{D}, t(\tau = 0) = 0 \quad (2.41)$$

La solución semianalítica definida por las Ecs. (2.33), (2.34) y (2.36) se utilizó para modelar la impregnación/deshidratación de cubos de papaya y para encontrar las difusividades efectivas ( $D$ ) y los puntos de equilibrio ( $\Phi_e$ ) como se describe a continuación.

La solución propuesta al problema de difusión inverso requiere de las curvas de los datos experimentales ( $\Phi_{k,exp}$  vs.  $t_{exp}$ ) para estimar los valores de  $D_k$  y  $\Phi_{ke}$  para el agua ( $k = w$ ), sólidos totales ( $k = s$ ), compuestos bioactivos ( $k = CFT, ANT$ ) y capacidad antioxidante ( $k = CAT$ ). Aunado a esto, a partir de los datos experimentales se debe estimar previamente el modelo de encogimiento expresado como función de la pérdida de agua  $L_1 = f(\Phi_w)$ . El procedimiento consta de dos etapas, primero se utilizan los valores experimentales de pérdida de agua ( $\Phi_{w,exp}$  versus  $t_{exp}$ ) y el modelo de encogimiento  $L_1 = f(\Phi_w)$ , para obtener  $D_w$ ,  $\Phi_{we}$ , y la curva de deshidratación predicha ( $\Phi_{w,sim}$  versus  $t_{sim}$ ). La curva simulada de  $\Phi_{w,sim}$  versus  $t_{sim}$  se almacena y se usa como tabla de interpolación en la estimación de  $D_k$  y  $\Phi_{ke}$  para las sustancias restantes ( $k = s, CFT, ANT, CAT$ ), que pueden ocurrir en cualquier orden, ya que hace posible el uso del modelo de encogimiento en estos casos. En cada etapa, se evalúan  $D_k$  y  $\Phi_{ke}$  ( $k = w, s, CFT, ANT, CAT$ ), para minimizar la suma de los cuadrados de los residuos ( $RSS$ ) entre los valores experimentales ( $\Phi_{k,exp}$ ) y simulados ( $\Phi_{k,sim}$ ):

$$RSS = \sum (\Phi_{k,exp}(t) - \Phi_{k,sim}(t))^2 \quad (2.42)$$

### 2.3.2.2. Cuñas de piñas

Se propuso modelar la transferencia de masa de agua, sólidos totales y compuestos bioactivos en piña de acuerdo a lo reportado por Ruiz-López et al. (2013) mediante la ecuación de difusión en estado no estacionario (segunda ley de Fick) haciendo uso de los siguientes supuestos: (i) las rebanadas de piña son homogéneas e isotrópicas, (ii) la forma del producto puede aproximarse mediante una sección de un cilindro anular (un octavo) representada en el sistema coordenado cilíndrico, (iii) los coeficientes de difusión son constantes, (iv) la contracción del producto es despreciable, (v) el proceso ocurre a temperatura constante y (vi) el medio osmótico no cambia su composición. El modelo adimensional de transferencia de masa que describe el proceso es:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\kappa^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} \quad (2.43)$$

para  $\xi_{int} \leq \xi \leq 1$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/8$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  y  $\tau > 0$ . El tiempo y coordenadas adimensionales se definen como:

$$\tau = \frac{Dt}{R^2} \quad (2.44)$$

$$\xi = \frac{r}{R} \quad (2.45)$$

$$\zeta = \frac{z}{L} \quad (2.46)$$

$$\kappa = \frac{L}{R} \quad (2.47)$$

donde  $L$  es la mitad del espesor de las rebanadas de piña y  $R$  es su radio exterior,  $r$  es la coordenada radial, y  $z$  es la coordenada axial perpendicular al plano  $xy$ , los subíndices 0 y e denotan un estado inicial o de equilibrio, respectivamente. El resto de las variables se definen de la misma forma que en el modelo usado para describir la

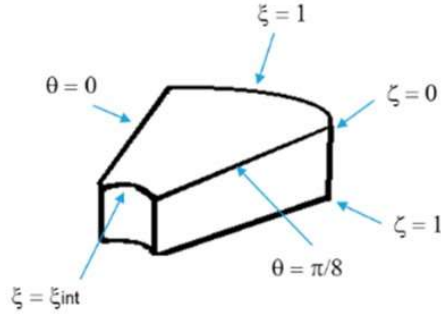


Figura 2.6. Diagrama que muestra la ubicación de las condiciones de frontera de la sección de cilindro anular usado para representar las muestras de piña.

deshidratación osmótica de los cubos de papaya. Para resolver el modelo se considera una distribución uniforme de las sustancias que se difunden en las rebanadas de piña al comienzo del proceso, es decir,  $\psi = 1$  para  $\xi_{int} \leq \xi \leq 1$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/8$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  y  $\tau = 0$ . Por otro lado, la condición de frontera en la superficie del producto implica una resistencia externa insignificante a la transferencia de masa debido al sistema agitado, por lo que  $\psi = 0$  en  $\xi = \xi_{int}, 1$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/8$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  y  $\tau > 0$  (superficie interior y exterior del cilindro),  $\psi = 0$  en  $\theta = \pi/8$ ,  $\xi_{int} \leq \xi \leq 1$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  y  $\tau > 0$  (superficie sobre el corte angular) y  $\psi = 0$  en  $\zeta = 1$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/8$ ,  $\xi_{int} \leq \xi \leq 1$  y  $\tau > 0$  (superficie sobre el corte longitudinal) (Figura2.6).

Los límites en las coordenadas angular ( $\theta = 0$ ) y axial ( $\zeta = 0$ ) implican que solo se resuelve un cuarto de dominio. De esta forma, es necesario incluir una condición de simetría en estas posiciones, es decir,  $\partial\psi/\partial\theta = 0$  para  $\theta = 0$ ,  $\xi_{in} \leq \xi \leq 1$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  y  $\tau > 0$  y  $\partial\psi/\partial\zeta = 0$  para  $\zeta = 0$ .

De acuerdo con Ruiz-López et al. (2013), la solución analítica de transferencia de masa en tres dimensiones ( $\Psi_{r\theta z}$ ) se puede obtener a partir de los componentes radial-

angular ( $\Psi_{r\theta}$ ) y axial ( $\Psi_z$ ), los cuales tienen la forma general:

$$\Psi_{r\theta} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \exp(-\lambda_{r\theta mn}^2 \tau_{r\theta}) \quad (2.48)$$

$$\Psi_z = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\lambda_{zm}^2 \tau_z) \quad (2.49)$$

donde  $\tau_{r\theta}$  y  $\tau_z$  se definen como:

$$\tau_{r\theta} = \frac{Dt}{L_r^2} \quad (2.50)$$

$$\tau_z = \frac{Dt}{L_z^2} \quad (2.51)$$

El número de Fourier  $\tau_{r\theta}$  tienen como longitud característica de difusión:

$$L_r = \frac{R_o - R_i}{2} \quad (2.52)$$

donde  $R_i$  y  $R_o$  son los radios interno y externo del producto, respectivamente. En cambio,  $L_z$  es la mitad del espesor de la muestra. La solución combinada en tres dimensiones es  $\Psi_{r\theta z} = \Psi_{r\theta} \Psi_z$ . Si se truncan las series (2.48) y (2.49) después del primer término y se saca logaritmo natural a la solución  $\Psi_{r\theta z}$  se obtiene:

$$\ln \Psi_{r\theta z} = \ln A_1 A_{11} - \left( \frac{\lambda_{r\theta 11}^2}{L_r^2} + \frac{\lambda_{z1}^2}{L_z^2} \right) Dt \quad (2.53)$$

Por lo tanto, el coeficiente de difusión se calcula a partir de la pendiente de la curva de  $\ln \Psi_{r\theta z}$  versus  $t$  una vez que se conocen  $\lambda_{r\theta 11}$  y  $\lambda_{z1}$  (Ruiz-López et al., 2013). En este caso  $\lambda_{r\theta 11} = 3.0567$  (valor para un octavo de cilindro con  $R_i/R_o = 0.2439$  y  $\lambda_{1z} = \pi/2$ ). El problema consiste en calcular  $\Psi_{r\theta z}$ , ya que no se conoce el valor de equilibrio. Por lo tanto, se propone el siguiente procedimiento iterativo: (i) se proporcionan valores

iniciales del coeficiente de difusión ( $D_k$ ) y del valor de equilibrio ( $\Phi_{ke}$ ) para el agua ( $k = w$ ), sólidos totales ( $k = s$ ), compuestos bioactivos ( $k = \text{CFT, ANT}$ ) y capacidad antioxidante ( $k = \text{CAT}$ ), (ii) se calculan  $\tau_{r\theta}$  y  $\tau_z$  a partir del valor propuesto de  $D_k$  y de los tiempos experimentales usando las Ecs. (2.48) y (2.49), respectivamente, (iii) se estima  $\Psi_{r\theta z}$  a partir del valor propuesto de  $\Phi_e$  como:

$$\Psi_{r\theta z} = 1 - \frac{\Phi}{\Phi_e} = \Psi_{r\theta} \Psi_z \quad (2.54)$$

Finalmente, en cada etapa, se evalúan  $D_k$  y  $\Phi_{ke}$  ( $k = w, s, \text{CFT, ANT, CAT}$ ) para minimizar la suma de cuadrados de los residuos ( $RSS$ ) entre los valores experimental ( $\Phi_{k,exp}$ ) y el simulado ( $\Phi_{k,sim}$ ):

$$RSS = \sum (\Phi_{k,exp}(t) - \Phi_{k,sim}(t))^2 \quad (2.55)$$

### 2.3.3. Análisis de datos

La calidad de ajuste de los modelos de impregnación y la significancia estadística de las estimaciones de los parámetros se realizó de la misma forma que en el modelo de transporte de masa propuesto para describir la deshidratación osmótica de los cubos de papaya.

## 2.4. Proceso de freído

### 2.4.1. Experimentos de freído en productos impregnados SST

Los cubos de papaya y rebanadas de piña impregnados con sacarosa (control) y SEJS a 65°C (6h) se seleccionaron para realizar la caracterización del efecto del procesamiento por freído con aire caliente sobre la degradación de los compuestos bioactivos

y capacidad antioxidante. Las muestras impregnadas fueron sometidas al proceso de fritura añadiéndoles 0.5 L de aceite de canola, y posteriormente se colocaron en el tambor rotatorio de una freidora de aire caliente de uso doméstico (Chefman, RJ38-10-RD-V2, China). Las muestras se frieron a 180°C durante 15 min, para posteriormente permitir su enfriamiento a temperatura ambiente (23 °C) para llevar a cabo su caracterización.

### **2.4.2. Determinación de compuestos bioactivos en producto frito**

Se determinaron los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante en las muestras fritas (papaya y piña) de acuerdo con la metodología reportada por Pardo-Botello et al. (2021) con el objetivo de separar los componentes hidrofílicos y lipofílicos presentes en los productos. Se licuó durante 1 min la muestra previamente pesada con 40 ml de hexano. Enseguida, la mezcla se colocó en un tubo de ensayo y se agitó en un agitador vortex (FinePCR, FINEVORTEX, Gyeonggi-do, Korea) durante 10 min, seguido de centrifugación (Hettich, Universal 320 R, Tuttlingen, Alemania) a 3000 rpm por 10 min. Posteriormente, se separó el sobrenadante (lipofílico) y los sólidos (hidrofílicos). Para la parte lipofílica, se tomó una alícuota de 1.5 ml y se secó en estufa (FD 23, Binder, Tuttlingen, Alemania) a 60°C hasta evaporar todo el solvente. Una vez seca, se agregaron 2 ml de acetona y 8 ml de agua destilada. Respecto a la parte hidrofílica, los sólidos se mezclaron con 10 ml de una solución de acetona, agua destilada y ácido acético (7:2.95:0.05ml), se mezcló 5 min en el vortex y se centrifugó a 3000 rpm durante 10 min. De la mezcla resultante se tomó una alícuota de 1.5 ml y se le agregaron 15 ml de agua destilada. Los extractos resultantes se almacenaron en condiciones de refrigeración a 4 °C en frascos ámbar hasta su uso. A ambos extractos se les determinaron los compuestos fenólicos totales (CFT), antocianinas totales (ANT)

y la capacidad antioxidante total (CAT) como se reportó en la Sección 2.3.

## III. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos del capítulo anterior para los diferentes procesos estudiados. Primeramente, se muestra la caracterización fisicoquímica (pH, SST, ATT, índice de madurez y color), compuestos fenólicos totales, antocianinas totales y capacidad antioxidante de las materias primas (papaya, piña y flor de Jamaica). La siguiente sección presenta los datos experimentales obtenidos del proceso de deshidratación osmótica de cubos de papaya con solución de sacarosa a diferentes temperaturas, así como el desarrollo de un nuevo modelo que considera el transporte de masa de agua y solutos acoplados. La tercera sección se enfoca en el proceso de impregnación de compuestos bioactivos en papaya y piña con solución de extracto de jamaica-sacarosa (SEJS) a tres diferentes temperaturas, donde se obtuvieron cinéticas experimentales de los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante que posteriormente fueron modelos tomando en cuenta la reducción de peso de los productos. En la última sección se estudio el efecto del proceso de fritura de papaya y piña impregnadas previamente con solución de sacarosa (control) y con SEJS sobre la retención del contenido de los compuestos bioactivos (CFT y ANT) y capacidad antioxidante. Los resultados presentados en las secciones 3.3.1 a 3.3.4 sobre la deshidratación osmótica e impregnación con bioactivos de papaya ya han sido publicados (Aguirre-García et al., 2023).

### 3.1. Caracterización fisicoquímica de materias primas

La caracterización fisicoquímica de papaya y piña, así como de extracto de flor de Jamaica (EJ) y de la solución de extracto de Jamaica/sacarosa (SEJS) se resume en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización fisicoquímica de los extractos de papaya, piña, Jamaica (EJ) y solución de EJ/sacarosa (SEJS).

Parámetro	Papaya	Piña	EJ	SEJS
pH	5.28 ± 0.02 <sup>A</sup>	4.68 ± 0.05 <sup>B</sup>	2.05 ± 0.01 <sup>C</sup>	2.46 ± 0.03 <sup>D</sup>
SST (°Bx)	5.51 ± 0.09 <sup>A</sup>	8.07 ± 0.64 <sup>B</sup>	6.35 ± 0.07 <sup>C</sup>	20.0 ± 0.1 <sup>D</sup>
ATT(g ACA/100g)	0.14 ± 0.02 <sup>A</sup>	0.69 ± 0.05 <sup>B</sup>	1.70 ± 0.09 <sup>C</sup>	1.36 ± 0.04 <sup>D</sup>
SST/ATT (°Bx/g ACA/100g)	40.8 ± 5.5 <sup>A</sup>	11.8 ± 1.21 <sup>B</sup>	3.75 ± 0.77 <sup>C</sup>	14.8 ± 0.4 <sup>B</sup>
<i>L</i> <sup>*</sup>	54 ± 8 <sup>A</sup>	80 ± 1 <sup>B</sup>	12 ± 1 <sup>C</sup>	11 ± 2 <sup>C</sup>
<i>a</i> <sup>*</sup>	26 ± 1 <sup>A</sup>	-3 ± 1 <sup>B</sup>	10 ± 0 <sup>C</sup>	1 ± 2 <sup>B</sup>
<i>b</i> <sup>*</sup>	41 ± 2 <sup>A</sup>	26 ± 0 <sup>A</sup>	-16 ± 1 <sup>C</sup>	-7 ± 1 <sup>C</sup>
<i>CFT</i> (mg GAE/100g b.h.)	402 ± 53 <sup>A</sup>	373 ± 26 <sup>A</sup>	1018 ± 79 <sup>B</sup>	688 ± 18 <sup>C</sup>
<i>ANT</i> (mg C3G/100g b.h.)	No realizado	No realizado	51.3 ± 2.0 <sup>A</sup>	38.9 ± 5.2 <sup>B</sup>
<i>CAT</i> (mg TE/100g b.h.)	679 ± 62 <sup>A</sup>	506 ± 30 <sup>B</sup>	1658 ± 61 <sup>C</sup>	1694 ± 40 <sup>C</sup>

\* Medias ± desviación estándar de tres repeticiones. Valores en la misma fila seguidos de la misma letra mayúscula no son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

Los valores de SST, ATT y SST/ATT en papaya se determinaron como 5.5±0.1°Bx, 0.14 ± 0.02 g ACA/100 g y 41 ± 6 °Bx/(g ACA/100 g), respectivamente (media ± d.e.). El color de los cubos de papaya se puede describir como un tono naranja cercano a los colores Pantone® 7576 c y 7566 c y los parámetros vectoriales CIELAB ( $L^*, a^*, b^*$ ) = (54, 26, 41) ± (8, 1, 2). El contenido de humedad inicial de la papaya se determinó como 92.6 ± 0.2 g agua/100 g producto fresco. La papaya se identificó como

fuelle importante de compuestos fenólicos ( $402 \pm 53$  mg GAE/100 g b.h.) y capacidad antioxidante ( $679 \pm 62$  mg TE/100 g b.h.) y sin cantidades detectables de antocianinas. Los valores anteriores también se expresaron como masa de bioactivo/capacidad antioxidante por base seca (b.s.) para permitir una comparación justa con otros estudios, dando como resultado  $54.3 \pm 7.2$  mg GAE/g b.s. y  $91.8 \pm 0.6$  mg TE/g b.s. Las propiedades fisicoquímicas, el contenido de bioactivos y capacidad antioxidante de los cubos de papaya son similares a los encontrados en otros estudios; por ejemplo, Gayosso-García et al. (2010) determinaron los SST, ATT y contenido de humedad de papaya verde y madura (var. Red Maradol) con valores de  $3.7 \pm 0.2$  y  $9.2 \pm 0.6^\circ\text{Bx}$ ,  $0.1 \pm 0$  y  $0.13 \pm 0$  g ACA/100 g, y  $93.2 \pm 0.4$  y  $89.0 \pm 1.0$  g agua/100 g, respectivamente, con una relación SST/ATT correspondiente entre  $37$  y  $71^\circ\text{Bx}/(\text{g ACA}/100 \text{ g})$ . Asghar et al. (2016) determinaron en pulpa de papaya, su CFT en  $37.8 \pm 0.1$  mg GAE/g b.s. mientras que Chan-León et al. (2021) informaron valores en el rango de  $74.9$  a  $90.8$  mg GAE/100 g b.h. para diferentes genotipos silvestres y comerciales (10 días después de la madurez fisiológica), donde los CFT disminuyeron significativamente a medida que maduraban los frutos de papaya. Por otro lado, Uribe et al. (2015) determinaron la CAT de papaya chilena en el rango de  $15.7$  a  $20.6$  mmol TE/100 g b.h. ( $3930$  a  $5156$  mg TE/100 g b.h.) bajo varios métodos de extracción.

Respecto a los valores de SST, ATT, y la relación SST/ATT en piña, se determinaron como  $8.07 \pm 0.64^\circ\text{Bx}$ ,  $0.69 \pm 0.05$  g ACA/100 g y  $12 \pm 1^\circ\text{Bx}/(\text{g ACA}/100 \text{ g})$  respectivamente (media  $\pm$  d.e.). El color de las rebanadas de piña se puede describir como un tono amarillo claro cercano a los colores Pantone® 5875 c y 4535 c y los parámetros vectoriales CIELAB ( $L^*, a^*, b^*$ ) =  $(80, -3, 26) \pm (1, 1, 0)$ . El contenido de humedad inicial de la piña se determinó como  $88.5 \pm 0.1$  g agua/100 g b.h. La piña se identificó como fuente importante de CFT ( $373 \pm 26$  mg GAE/100 g b.h.) y CAT

( $506 \pm 30$  mg TE/100 g b.h.), sin cantidades detectables de antocianinas. Los valores anteriores también se expresaron como masa de bioactivo/capacidad antioxidante por base seca (b.s.) para permitir una comparación justa con otros estudios, dando como resultado  $32.5 \pm 3.5$  mg GAE/g b.s. y  $71.7 \pm 4.1$  mg TE/g b.s. Kongsuwan et al. (2009) determinaron SST, ATT y contenido de humedad en diferentes variedades de piña con valores de  $13 \pm 0.4$  y  $14 \pm 0.2$  °Bx,  $0.65 \pm 0$  y  $0.68 \pm 0$  g ACA/100 g, y  $85 \pm 0.2$  y  $87 \pm 0.5$  con g agua/100 g, respectivamente, con una relación SST/ATT correspondiente entre 21 y 23 °Bx/(g ACA/100 g).

Los valores de pH, SST, ATT y SST/ATT en extracto de Jamaica se determinaron como  $2.1 \pm 0.0$ ,  $6.4 \pm 0.1$  °Bx,  $1.7 \pm 0.1$  g ACA/100 g y  $3.8 \pm 0.8$  °Bx/(g ACA/100 g), respectivamente (media  $\pm$  d.e.). El extracto tiene un color azul-magenta con los estándares coincidentes Pantone® 276 c y 5255 c y  $(L^*, a^*, b^*) = (12, 10, -16) \pm (1, 0, 1)$ . El extracto de Jamaica sin sacarosa añadida se identificó como una fuente rica en antocianinas ( $51 \pm 2$  mg C3G/100 g peso fresco) y compuestos fenólicos ( $1018 \pm 79$  mg GAE/100 g b.h.), con una alta capacidad antioxidante ( $1658 \pm 61$  mg TE/100 g b.h.). Estos últimos valores también se calcularon por masa de cálices secos de Jamaica como  $6.45 \pm 0.24$  mg C3G/g,  $128 \pm 10$  mg GAE/g b.s. y  $208 \pm 8$  mg TE/g b.s. Los valores del contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante del extracto de Jamaica son comparables con lo reportado por otros autores. Chumsri et al. (2008) determinaron las ANT en cálices secos de Jamaica en el rango de 4.55 a 5.02 mg C3G/g b.s. bajo varias condiciones de extracción (30 y 60 min, 50 y 60°C, 10 ml de agua por gramo de cálices secos de Jamaica). Se encontró que el pH y SST del extracto de Jamaica correspondiente variaban entre 2.9-3.0 y 6.0-6.2 °Bx, respectivamente. De igual forma, Ochoa-Velasco & Ruiz-López (2019) determinaron la CFT y CAT de cálices de Jamaica en 306 mg GAE/g b.s. y 541 mg TE/g b.s. Por otro lado, ? reportaron ANT y

CFT de extracto de Jamaica acuoso ( $75^{\circ}\text{C}$  por 1 h, 20 ml de agua por gramo de cálices secos de Jamaica) como  $18.0 \pm 1.2$  mg C3G/100 g PF y  $1951 \pm 48$  mg GAE/100 g b.h., respectivamente. Dinçer (2021) utilizó un extracto de Jamaica ( $75^{\circ}\text{C}$  por 30 min, 20 ml de agua por gramo de cálices secos de Jamaica) ajustado a  $1^{\circ}\text{Bx}$  para impregnar antocianinas en manzana, reportando alrededor de 11.8 mg C3G por 100 ml de extracto (este valor debe estar entre 42.2 y 70.8 mg C3G/100 ml en extracto de Jamaica no diluido si su contenido inicial de SST está en el rango de 4 a 6  $^{\circ}\text{Bx}$ ). Recientemente, Hernández-Carranza et al. (2022) informaron los valores de CFT, ANT y CAT como  $424 \pm 2$  mg GAE/100 g b.h.,  $290 \pm 10$  mg C3G/100 g b.h. y  $1815 \pm 4$  mg TE/100 g b.h. (temperatura ambiente, 24 h, 5: 1 proporción de agua a flor de Jamaica), respectivamente.

## **3.2. Proceso de deshidratación osmótica de papaya**

### **3.2.1. Pérdida de agua y ganancia de solutos**

La Figura 3.1 presenta la evolución de la pérdida de agua (PA) y ganancia de sólidos (GS), la cual muestra un comportamiento asintótico a medida que aumenta el tiempo. Los cambios en los valores de PA y GS alcanzaron una diferencia relativa igual o inferior al 1% entre los dos últimos tiempos de muestreo (300 y 330 min) en todas las condiciones experimentales (se utilizó un promediado en el tiempo para suavizar el error experimental). Dependiendo de las condiciones experimentales, la pérdida de agua máxima alcanzable después de 300 min estuvo en el rango de 45.7-54.9 g agua/100g producto sin procesar (p.s.p), mientras que los valores de ganancia de sólidos estuvieron en el rango de 16.9-30.3 g sólidos/100g p.s.p.

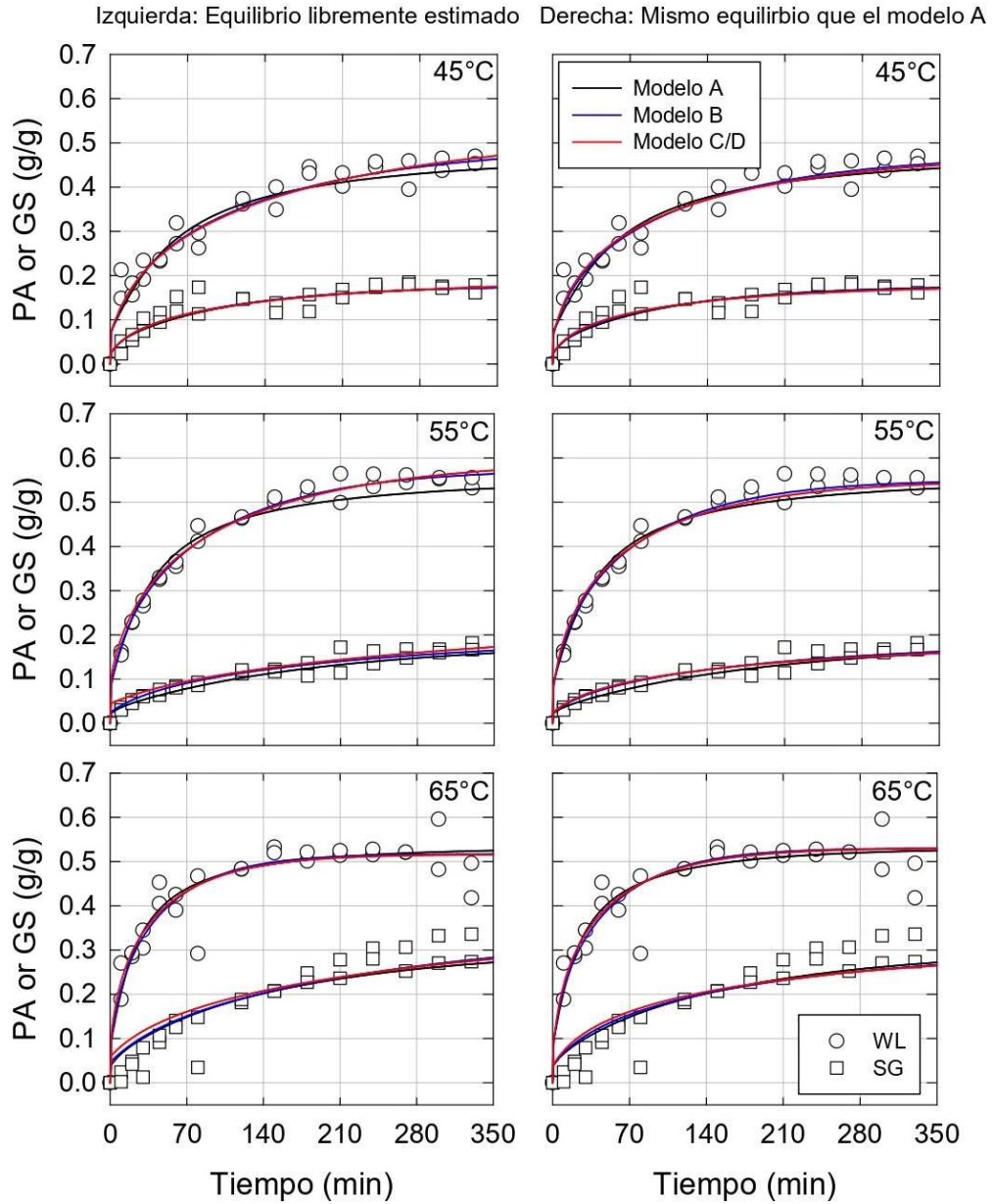


Figura 3.1. Comparación de la pérdida de agua y ganancia de sólidos experimentales y ajustados bajo diferentes consideraciones de modelado. Consulte la Tabla 2.1 para obtener una descripción detallada de las características de los modelos.

La reducción de peso ( $WR$ ) correspondiente estuvo entre 19.5 y 38.0 g/100g p.s.p. (Figura 3.2), mientras que el índice de deshidratación ( $DI$ ) estuvo en el rango de 1.64

a 3.26 g agua/g sólidos (Figura 3.3).

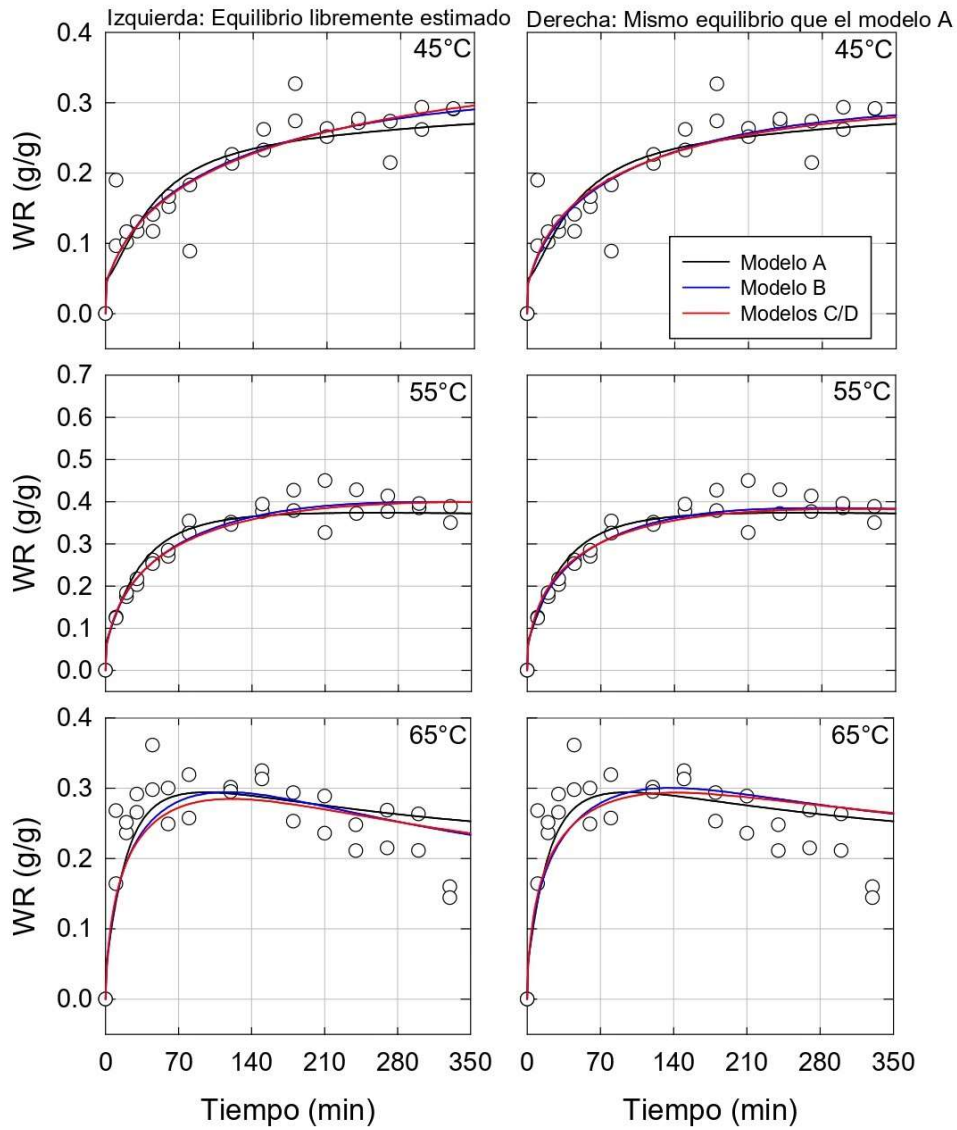


Figura 3.2. Comparación de la reducción de peso experimental y predicha bajo diferentes consideraciones de modelado. Consulte la Tabla 2.1 para obtener una descripción detallada de las características de los modelos.

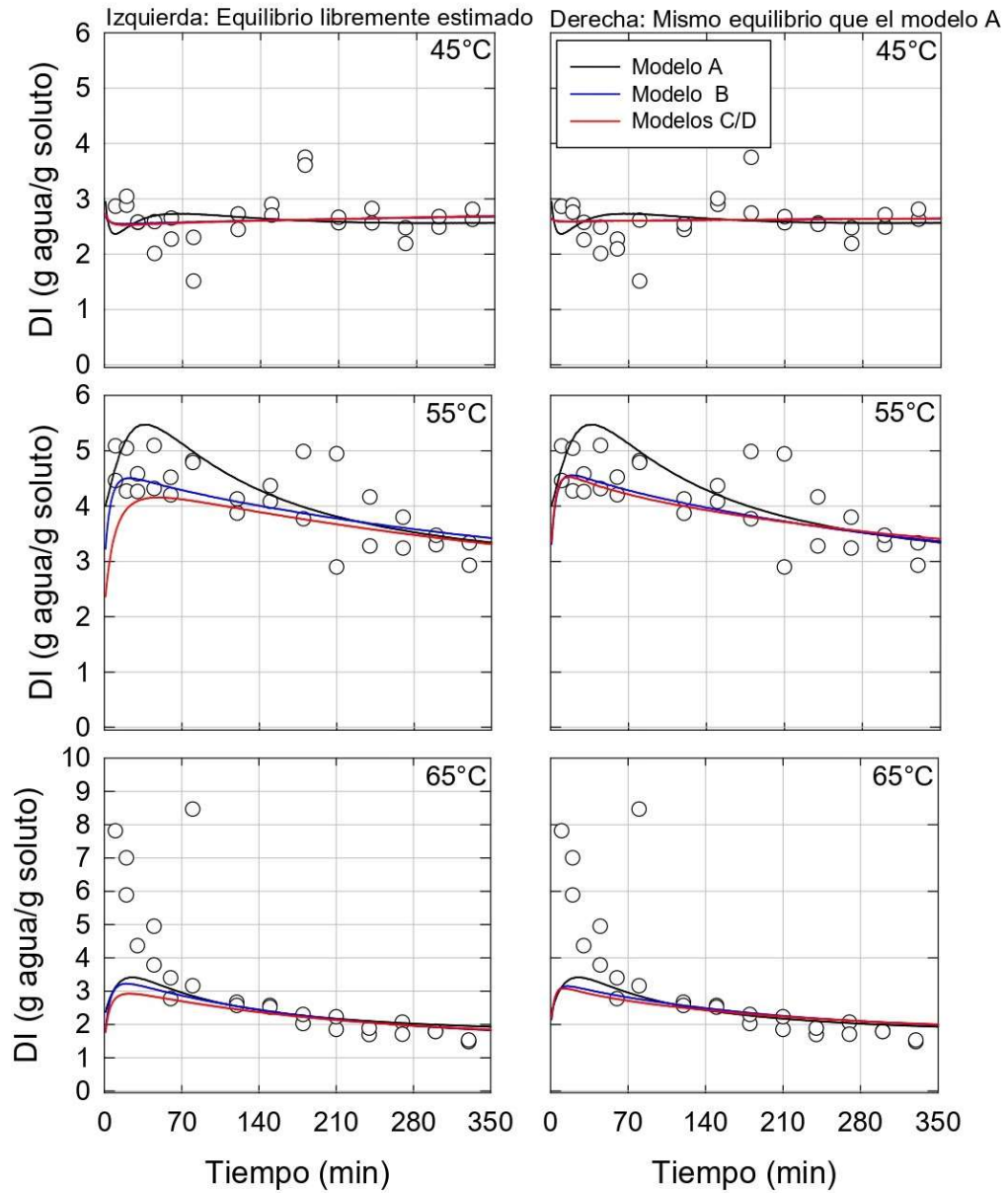


Figura 3.3. Comparación del índice de deshidratación experimental y predicho bajo diferentes consideraciones de modelado. Consulte la Tabla 2.1 para obtener una descripción detallada de las características de los modelos.

El-Aouar et al. (2006) observaron niveles de deshidratación e impregnación de 32.4-52.8 g agua/100 g p.s.p. y 9.7-17.8 g soluto/g p.s.p. ( $WR = 18.2-40.8$  g/g p.s.p. y

DI = 2.1-4.6 g agua/g sólidos), respectivamente, durante la deshidratación osmótica de rodajas de papaya (0.5 cm×3 cm×5 cm) después de inmersión en soluciones de sacarosa (44 a 56°Bx, 34 a 46°C, 120 a 210 min). Del mismo modo, Jain et al. (2010) realizaron la deshidratación osmótica de cubos de papaya (1 cm<sup>3</sup>) en soluciones de sacarosa (50°Bx, 30 a 50°C, 4 a 6 h), logrando valores de pérdida de agua y ganancia de sólidos en el rango de 23.6-35.2 g agua/100 g p.s.p. y 3.0-5.5 g sólidos/g p.s.p. (WR = 20.6-29.7 g/g p.s.p. y DI = 6.4-7.9 g agua/g sólidos). Recientemente, Barragán-Iglesias et al. (2018b) reportaron valores de pérdida de agua y ganancia de sólidos en los rangos de 38.1-65.9 g agua/100 g p.s.p. y 15.7-18.5 g sólidos/100 g p.s.p. (WR = 19.8-50.2 g/g p.s.p. y DI = 2.1-4.2 g agua/g sólidos) al realizar la deshidratación osmótica de cubos de papaya pretratados (25°C, 3,0 h, 15 g Ca(OH)<sub>2</sub>/L agua) (1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm) en soluciones de sacarosa (45 a 60°Bx, 50 a 70°C, 150 minutos).

Los valores de PA, GS, WR y DI reportados en la mayoría de los casos son comparables a los encontrados en este estudio con diferencias menores muy probablemente debidas tanto a la variedad utilizada como al estado de madurez de la fruta, ya que la papaya sufre muchos cambios fisiológicos durante su maduración (Barragán-Iglesias et al., 2018a), lo que puede afectar sus características de transferencia de masa (Gayosso-García et al., 2010). Las variedades “Formosa” y “Taiwan red” fueron utilizadas por El-Aouar et al. (2006) y Jain et al. (2010), respectivamente, mientras que la variedad “Maradol”, al igual que en este estudio, fue estudiada por Barragán-Iglesias et al. (2018b). Barragán-Iglesias et al. (2018b) utilizó una fruta más madura en comparación con la investigación actual (50% *versus* 25% de piel naranja-roja), mientras que las referencias restantes no incluyeron información sobre la etapa de madurez. También es importante resaltar que Jain et al. (2010) utilizaron una relación de masa de fruta a solución baja (4:1) que puede haber contribuido a una dilución importante del medio

osmótico, conduciendo a valores de GS más bajos y valores de DI más altos. Tanto la PA como la GS aumentaron asintóticamente a lo largo del proceso de deshidratación osmótica alcanzando sus valores de estado estacionario (Figura 3.1); sin embargo, las curvas de WR y DI exhibieron un comportamiento diferente (Figuras 3.2 y 3.3). La WR alcanzó claramente un valor en estado estacionario después de 140 min a 55°C; sin embargo, este límite nunca se alcanzó a 45 °C, mientras que se observó un máximo alrededor de 70 min a 65 °C con una disminución adicional a partir de entonces. El comportamiento de WR está influenciado por la tasa relativa a la que se alcanzan los niveles de equilibrio de PA y GS. Según la teoría de la difusión, tanto PA como GS pueden aproximarse mediante la siguiente ecuación de primer orden (Estévez-Sánchez et al., 2021) ( $j = w, s$ ):

$$\langle \gamma_j \rangle = \gamma_{je} (1 - \exp(-\lambda_1^2 \tau_j)) = \gamma_{je} \left( 1 - \exp\left(-\lambda_1^2 \frac{D_j t}{L^2}\right) \right) \quad (3.1)$$

donde  $\lambda_1$  es el primer valor propio de la solución analítica para la ecuación de difusión en estado no estacionario bajo una frontera de equilibrio instantáneo en la geometría deseada,  $\tau_j$  es el número de Fourier y  $L$  es la longitud característica de difusión. En consecuencia, la WR está dada por la expresión:

$$WR = PA - GS = PA_e (1 - \exp(-\lambda_1^2 \tau_w)) - GS_e (1 - \exp(-\lambda_1^2 \tau_s)) \quad (3.2)$$

La ecuación anterior se puede escribir en la siguiente forma adimensional:

$$\frac{WR}{PA_e} = (1 - \exp(-\lambda_1^2 \tau_w)) - c_1 (1 - \exp(-c_2 \lambda_1^2 \tau_w)) \quad (3.3)$$

con  $c_1 = GS_e/PA_e$  y  $c_2 = D_s/D_w$ . Se puede seguir un enfoque similar con  $DI$ , donde

se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{DI}{DI_e} = \frac{PA/GS}{PA_e/GS_e} = \frac{1 - \exp(-\lambda_1^2 \tau_w)}{1 - \exp(-c_2 \lambda_1^2 \tau_w)} \quad (3.4)$$

Las ecuaciones 3.3 y 3.3 se pueden utilizar para explorar el efecto de la relación  $D_s/D_w$  ( $c_2$ ) y la relación final de deshidratación osmótica ( $c_1$ ) en WR y DI como se muestra en la Figura 3.4 solo se explora para valores inferiores a uno como suele observarse para la mayoría de los productos y condiciones de funcionamiento).

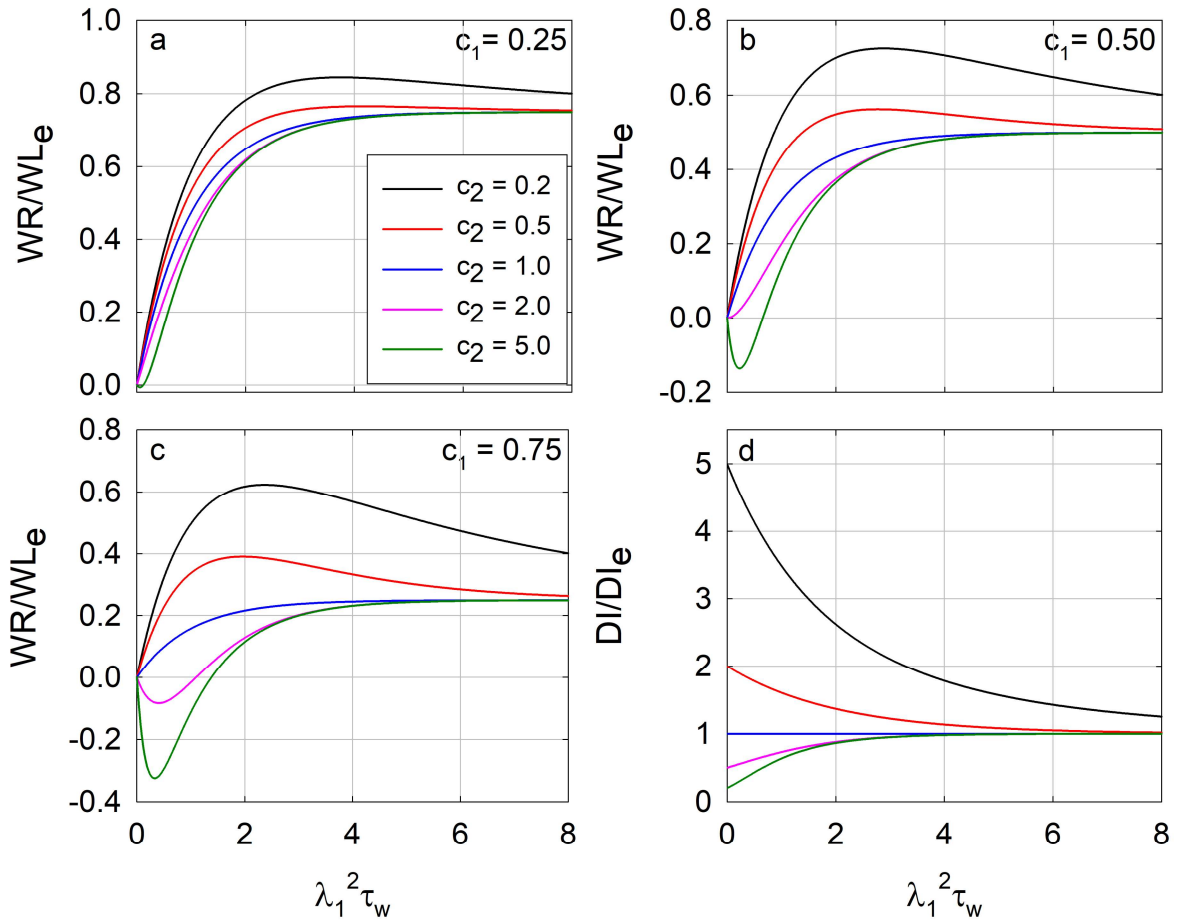


Figura 3.4. Efecto de la relación final de deshidratación osmótica ( $c_1$ ) y la relación de difusividad de soluto-agua ( $c_2$ ) en la reducción de peso adimensional (a-c) y el índice de deshidratación adimensional (d).

Dependiendo de  $c_1$ , si la PA es más rápida que la GS ( $c_2 < 1$ ), entonces la curva WR exhibirá un máximo positivo (Figura 3.4a-3.4c) como el observado durante la deshidratación osmótica de papaya a 65°C (Figura 3.2). Además, la masa del producto puede aumentar temporalmente bajo ciertas combinaciones de  $c_1$  y  $c_2$  (WR se vuelve negativa), pero este escenario requiere que los valores de GS finales se acerquen a los observados para PA ( $c_1 \rightarrow 1$ ) y proporciones altas  $D_s/D_w$ , condiciones que no se reportan a menudo en alimentos. Esta figura demuestra que las curvas WR y DI se pueden utilizar para inferir información sobre el tamaño relativo de las difusividades de masa, así como la relación final GS/PA.

Las diferencias relativas entre las tasas de PA y GS también provocan un comportamiento de  $DI$  diferente para cada temperatura de deshidratación osmótica. A 45°C, la DI es casi constante, mientras que disminuye continuamente a temperaturas más altas (65°C) (Figura 3.3). En este caso, la DI disminuye cuando  $D_s/D_w < 1$  y la curva se aplanan cuando esta relación se acerca a uno, mientras que aumenta si  $D_s/D_w > 1$  (Figura 3.4d). Mokhtar et al. (2018) informaron un DI creciente con el tiempo durante la deshidratación osmótica de rodajas de papa con soluciones de sacarosa (50%) y NaCl (10%) (20-22 °C), lo que indica que la impregnación se produce más rápido que la deshidratación. Por otro lado, Gayosso-García et al. (2010) informaron un comportamiento creciente de WR (como el que se muestra en la Figura 3.2 a 45°C) y DI casi constante durante la deshidratación osmótica de papaya verde con soluciones de sacarosa (40°Bx, 25°C), un comportamiento relacionado con valores comparables de PA y SG. Por lo tanto, el comportamiento de DI puede usarse para inferir la relación  $D_s/D_w$  incluso si no se estiman las difusividades de agua y soluto como en los estudios de Gayosso-García et al. (2010) y Mokhtar et al. (2018). El comportamiento de DI es único para los alimentos procesados y depende en gran medida de las condiciones

de procesamiento seleccionadas, como se ve en algunos estudios con papaya y otras verduras como manzana, higo y papa; sin embargo, a diferencia de la PA y GS, no necesariamente aumenta con el tiempo, la temperatura y la concentración del medio osmótico (El-Aouar et al., 2006; Etemadi et al., 2020; Jain et al., 2010; Mokhtar et al., 2018; Vasconcelos et al., 2012).

### 3.2.2. Características de encogimiento

Durante la deshidratación de alimentos, los esfuerzos mecánicos causados por los flujos de transferencia de masa inducen el colapso de la estructura porosa originalmente llena y sostenida por agua, que finalmente conduce al encogimiento del producto (Aprajeeta et al., 2015). Por lo tanto, la reducción de tamaño de los alimentos osmodeshidratados se relaciona muy a menudo con la PA (Mayor et al., 2011; Souraki et al., 2014), y se siguió el mismo enfoque en este estudio. Además, como las muestras de papaya alcanzaron la misma reducción de volumen para niveles de deshidratación comparables, independientemente del tiempo de procesamiento y la temperatura considerados (Figura 3.5), todas las temperaturas se agruparon para ajustarse a un único modelo de contracción, una práctica común en otros estudios (González-Pérez et al., 2019; Mayor et al., 2011; Souraki et al., 2014).

Los datos de encogimiento no siguen un comportamiento de línea recta durante todo el intervalo de PA (se produce una ligera inflexión a aproximadamente 0.1 g de agua/g de producto fresco). Por lo tanto, se propuso la siguiente ecuación que es capaz de reproducir dicho comportamiento,

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \gamma_w - k (\exp(-\gamma_w/k) - 1) \quad (3.5)$$

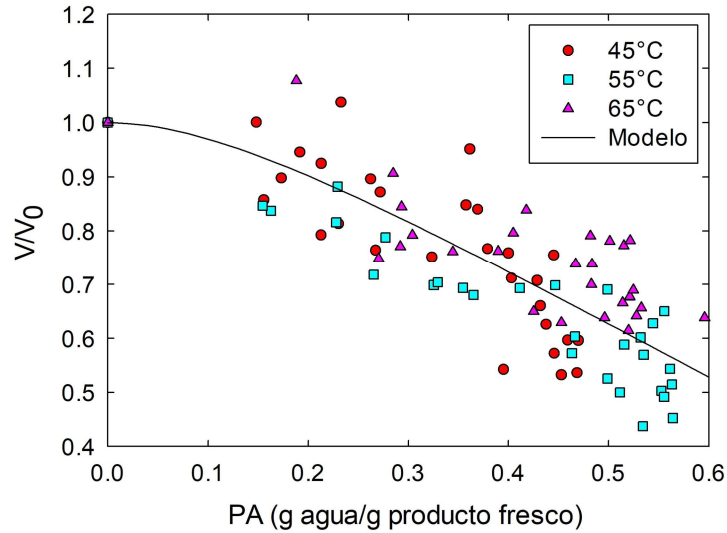


Figura 3.5. Características de encogimiento de los cubos de papaya durante la deshidratación osmótica a diferentes temperaturas.

donde  $k = 0.118 \pm 0.022$  g agua/g producto fresco (valor estimado  $\pm$  intervalos de confianza al 95%) y  $V_0 = 3.2 \pm 0.2$  cm<sup>3</sup> (valor esperado del tamaño inicial de la muestra). Este modelo exhibe una desviación promedio de alrededor del 9.8% de los datos experimentales. La ecuación del volumen describe completamente los cambios dimensionales de los cubos de papaya deshidratada osmóticamente porque la geometría elegida favorece un encogimiento isotrópico, mientras que otras geometrías requerirían el uso de ecuaciones separadas para representar el acortamiento de cada dimensión del producto (da Silva Júnior et al., 2016; de Almeida Aires et al., 2018). Se sabe que la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) afecta las características de encogimiento de la papaya y otros materiales alimenticios durante el secado convectivo (Kurozawa et al., 2012). En este caso, la papaya se encuentra inicialmente en su estado gomoso debido a su alto contenido de agua (0.85 kg de agua/kg de producto en el estudio actual). Dependiendo de los niveles de PA y GS, el contenido de humedad final del producto está entre 0.42 y 0.54 kg agua/kg producto. El proceso de deshidratación osmótica termina

cuando la fruta y la solución se equilibran al mismo potencial químico o de manera equivalente a la misma actividad del agua ( $a_w$ ). La  $a_w$  de una solución de sacarosa de 50°Bx está por encima de 0.98 en el rango de temperatura investigado de 45 a 65°C (Gharsallaoui et al., 2008) y permanece prácticamente constante porque la dilución de la solución osmótica puede considerarse insignificante (la concentración nunca cae debajo de 47°Bx debido a la alta proporción de masa de solución a fruta utilizada); por lo tanto, se espera que los cubos de papaya tengan un valor alto de  $a_w$  a lo largo del proceso ( $>0.98$ ). La fruta puede o no sufrir una transición al estado vítreo dependiendo de las condiciones de procesamiento. Kurozawa et al. (2012) observaron dos regiones de transición vítrea para papaya ubicadas en  $0.113 \leq a_w \leq 0.843$  (19.7 a -83.8°C) y  $0.113 \leq a_w \leq 0.689$  (70.0 a 34.6°C) y según estos autores la fruta necesitaría tener una fracción de agua por debajo de 0.3 para exhibir una transición al estado vítreo bajo temperaturas similares a las utilizadas en nuestro estudio, y estas condiciones estaban lejos de cumplirse en los experimentos actuales de deshidratación osmótica. Además de la  $T_g$ , el fenómeno de contracción puede estar gobernado por otros factores, incluida la resistencia mecánica de la matriz (Khalloufi et al., 2009; Kurozawa et al., 2012). Por lo tanto, se formula que la región de contracción no lineal inicial no es causada por una transición de  $T_g$ , sino se debe a una matriz alimentaria que requiere sufrir un esfuerzo por encima de un cierto umbral antes de que comience a mostrar una contracción apreciable.

La densidad aparente de los cubos de papaya aumentó con la PA hasta un 40% de su valor inicial ( $1.03 \pm 0.04$  g/cm<sup>3</sup>, media  $\pm$  d.e.) al final del proceso de deshidratación osmótica (Figura 3.6).

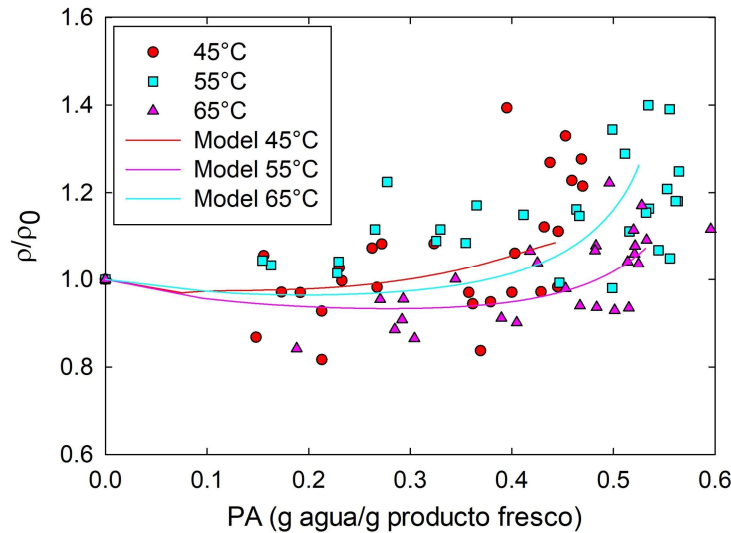


Figura 3.6. Cambios de la densidad de cubos de papaya durante la deshidratación osmótica a diferentes temperaturas.

Udomkun et al. (2015) y Udomkun & Innawong (2018) también reportaron un aumento en la densidad aparente de paralelepípedos de papaya ( $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ ) luego de inmersión en solución de sacarosa ( $30^\circ\text{Bx}$ ,  $60^\circ\text{C}$ , 1 h), de  $0.970 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$  en papaya fresca a  $1.02 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$  (aumento del 5.2%) en muestras pretratadas (con valores de PA y GS correspondientes de 49.3 g agua/100 g p.s.p. y 0.12 g sacarosa/100 g p.s.p., respectivamente). En este caso, el menor aumento de densidad observado por estos autores puede explicarse tanto por un cultivo de papaya diferente como por un proceso de deshidratación osmótica realizado para tiempos de inmersión más cortos, muestras más grandes y concentraciones de soluto más bajas, condiciones experimentales que conducen a menores tasas de transferencia de masa. También se ha observado un aumento en la densidad aparente durante la deshidratación osmótica con otros productos agrícolas como champiñón y plátano. Según Torringa et al. (2001), la densidad aparente de las mitades de hongos aumentó entre un 40% y un 64% después de pretratamientos de deshidratación osmótica con soluciones de NaCl (10-15 g NaCl/g

solución, 20-45°C, 10-110 min) desde un valor inicial de 0.67 g/cm<sup>3</sup> en muestras frescas, con mayor incremento a valores más altos de *PA* (3.61-28.6 g agua/100 g p.s.p.) y *GS* (1.43-3.57 g soluto/100 g p.s.p.). Posteriormente, Gallegos-Marin et al. (2016) reportaron un comportamiento similar para rodajas de plátano (1.6 mm de espesor y 3.2 cm de diámetro) donde la densidad aparente en muestras osmódeshidratadas aumentó con el tiempo (hasta 280 min), la concentración de sacarosa (29 y 45°Bx), la temperatura de la solución (40, 60 y 80°C), *PA* (11,6 a 31,6 g agua/100 g p.s.p.) y *GS* (10.4 a 27.0 g soluto/100 g p.s.p.), alcanzando valores entre un 6 % y un 25 % superiores a los determinados en muestras frescas (1.08 g/cm<sup>3</sup>).

### **3.2.3. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica**

Las difusividades de agua/soluto y los niveles de equilibrio de deshidratación/impregnación de los cubos de papaya estimados bajo los supuestos explorados se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Efecto de los supuestos de modelado sobre los parámetros de transferencia de masa estimados (valores de equilibrio estimados libremente).

Modelo	Temperatura (°C)	Parámetros de pérdida de agua*			Parámetros de ganancia de solutos*			R <sup>2</sup>
		D <sub>w</sub> × 10 <sup>10</sup> (m <sup>2</sup> /s)**	γ <sub>wc</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>s</sub> /D <sub>w</sub>	D <sub>s</sub> × 10 <sup>10</sup> (m <sup>2</sup> /s)**	γ <sub>sc</sub>	
A	45	2.52±0.29	0.47±0.00	0.958	2.04±0.02	5.14±0.59	0.18±0.00	0.878
	55	3.31±0.29	0.55±0.00	0.978	1.18±0.02	3.91±0.34	0.19±0.00	0.929
	65	5.48±1.43	0.53±0.00	0.910	0.99±0.08	5.43±1.42	0.30±0.03	0.853
B	45	6.52±0.85 (159)	0.49±0.01 (4.26)	0.966	1.09±0.33 (-46.6)	7.11±0.93 (38.2)	0.18±0.03 (0)	0.885
	55	9.25±0.56 (179)	0.57±0.00 (3.64)	0.991	0.60±0.07 (-49.2)	5.55±0.34 (42.1)	0.20±0.02 (5.26)	0.948
	65	18.3±4.39 (234)	0.52±0.01 (-1.89)	0.914	0.37±0.28 (-62.6)	6.77±1.62 (24.8)	0.37±0.22 (23.3)	0.856
C	45	5.67±1.93 (125)	0.53±0.05 (12.8)	0.967	1.29±0.86 (-36.8)	7.31±2.49 (42.3)	0.19±0.02 (5.55)	0.885
	55	9.30±0.91 (181)	0.60±0.01 (9.09)	0.989	0.40±0.00 (-66.1)	3.72±0.36 (-4.76)	0.28±0.00 (47.4)	0.950
	65	21.7±5.20 (296)	0.52±0.02 (-1.89)	0.915	0.37±0.05 (-62.6)	8.03±1.92 (48.0)	0.37±0.00 (23.3)	0.839
D	45	5.02±1.71 (99.2)	0.53±0.05 (12.8)	0.967	1.29±0.86 (-36.8)	6.48±2.20 (26.0)	0.19±0.02 (5.55)	0.885
	55	8.03±0.79 (142)	0.60±0.01 (9.09)	0.989	0.40±0.00 (-66.1)	3.21±0.32 (-17.8)	0.28±0.00 (47.4)	0.950
	65	19.2±24.62 (251)	0.52±0.02 (-1.89)	0.915	0.37±0.05 (-62.6)	7.11±1.71 (31.1)	0.37±0.00 (23.3)	0.839

\*Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores entre paréntesis representan la diferencia relativa (%) con respecto a los resultados estimados con el modelo A. \*\*Valores estimados como el producto de las columnas D<sub>w</sub> y D<sub>s</sub>/D<sub>w</sub>.

La notación  $D_j(M)$  se usa de aquí en adelante para indicar los valores de difusividad ( $j = w, s$ ) los cuales se estimaron a partir del modelo  $M$  ( $M = A, B, C, D$ ). Las difusividades del agua se calcularon en los rangos de  $2.52 \leq D_w(A) \leq 5.48$ ,  $6.52 \leq D_w(B) \leq 18.3$ ,  $5.67 \leq D_w(C) \leq 21.7$  y  $5.02 \leq D_w(D) \leq 19.2$  ( $\times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s). Las suposiciones hechas en los modelos  $B$ ,  $C$  y  $D$  condujeron a una sobreestimación de los valores de difusividad del agua en aproximadamente un 99 a 296% en comparación con los estimados sin simplificaciones (modelo  $A$ ), sin embargo todos los modelos lograron una buena reproducción de los valores experimentales de  $PA$  ( $R^2 > 0.91$ ,  $3.2\% \leq MRD \leq 8.5\%$ ) y predijeron un aumento significativo en la movilidad del agua al incrementarse la temperatura del proceso ( $p < 0.05$ ).

Al igual que el modelo  $A$ , el modelo  $B$  corrige continuamente las dimensiones del producto durante la simulación y ambas implementaciones generan ecuaciones de transporte de masa acopladas si el modelo de encogimiento depende de  $PA$ ,  $GS$  ó  $WR$ . Por lo tanto, las diferencias entre estos modelos no pueden explicarse únicamente en términos del encogimiento, en cambio, surgen del término adicional  $g_j$  ( $j = w, s$ ) en el modelo  $A$ , que está relacionado con los cambios en la densidad del producto. La concentración de soluto o agua en la Ec. 2.1 se puede expresar en términos de otras cantidades como ( $j = w, s$ )

$$C_j = \rho_x x_j = \rho_y y_j = \rho_z z_j \quad (3.6)$$

$$x_j = \frac{m_j}{m_p}; \rho_x = \frac{m_p}{V}; y_j = \frac{m_j}{V_0}; \rho_y = \frac{V_0}{V}; z_j = \frac{m_j}{m_{j0}}; \rho_{zj} = \frac{m_{j0}}{V} \quad (3.7)$$

donde  $x$  es la fracción másica,  $y$  es la relación de masa instantánea a volumen inicial,  $z$  es la relación de masa instantánea a inicial de la sustancia que se difunde,  $\rho_x$  es la densidad del producto,  $\rho_y$  es la relación de volumen inicial a instantáneo y  $\rho_{zj}$  es

la relación entre la masa inicial de  $j$  y el volumen instantáneo. La variable  $x$  ha sido utilizada por Hough et al. (1993), la variable  $y$  ha sido utilizada por Zecchi & Gerla (2020) y la variable  $z_j$  ha sido utilizada por Estévez-Sánchez et al. (2021) para expresar las ecuaciones de transporte de masa para describir la deshidratación osmótica de varios alimentos. Si cualquiera de  $\rho_x$ ,  $\rho_y$  ó  $\rho_{z_j}$  se considera constante en la Ec. 2.1 con  $C_j$  definida como en la Ec. 3.3, entonces el modelo de deshidratación osmótica final es idéntico a las Ecs. 2.14y 2.16, simplemente haciendo  $g_w = g_s = 0$  y reemplazando  $\gamma_j$  con  $x_j$ ,  $y_j$  ó  $z_j$ , respectivamente ( $j = w, s$ ). Esta última suposición se ha utilizado en otros estudios relacionados con la deshidratación osmótica de los alimentos que se encogen. Si  $\rho_x$ ,  $\rho_y$  ó  $\rho_{z_j}$  cambian durante la deshidratación osmótica, entonces surgirá en el modelo un término adicional similar a  $g_j$  ( $j = w, s$ ), que se puede obtener mediante un procedimiento similar al presentado en el desarrollo del modelo. La única forma de evitar que aparezca el término  $g_j$  es resolver el modelo de transporte de masa directamente en términos de  $C_j$  ( $j = w, s$ ); sin embargo, seguirían acoplados a través del modelo de encogimiento. Por lo tanto, las unidades de concentración utilizadas para expresar la deshidratación e impregnación de los alimentos durante la deshidratación osmótica dieron lugar a diferentes supuestos implícitos en el modelado, cuyo impacto en la estimación de las propiedades de transferencia de masa a menudo se ignora.

En este estudio, la ecuación que describe el encogimiento de los cubos de papaya solo depende de PA, por lo que la ecuación de PA podría resolverse independientemente de la ecuación de GS en los modelos A y B, pero la ecuación de GS aún requiere la solución de la PA. Ambas ecuaciones podrían desacoplarse usando una relación explícita entre PA y GS como lo muestra Estévez-Sánchez et al. (2021). Otra técnica implica el uso de dos ecuaciones de contracción separadas en términos de cantidades de agua o soluto (da Silva Júnior et al., 2016; de Almeida Aires et al., 2018; de Farias Aires et al.,

2017,1; González-Pérez et al., 2019).

Los modelos C y D comparten la suposición de sólido rígido, pero el modelo D compensa la estimación de  $D_w$  usando una longitud corregida por difusión. Como resultado, el modelo D produjo valores de  $D_w$  más bajos que el modelo C (alrededor de 11 a 14%), pero dicha diferencia no fue significativa ( $p > 0.05$ ). De acuerdo con la teoría de la difusión, los sólidos más gruesos requieren tiempos de procesamiento más largos que los necesarios para que los más delgados alcancen un nivel de concentración, dada la misma difusividad de masa y condiciones experimentales, es decir, el sólido grueso exhibe tasas de transferencia de masa más bajas. Por lo tanto, si la cinética de concentración se determina experimentalmente para un producto que se encoge, se requerirán valores de difusividad más altos para producir las mismas tasas de transferencia de masa si el acortamiento de la ruta de difusión no se considera en los cálculos. Este hecho ha sido reportado por varios autores para estimar  $D_w$  y  $D_s$  durante la deshidratación osmótica (de Farias Aires et al., 2016; González-Pérez et al., 2019). Por lo tanto, se esperaba que el modelo C sobrestimara las difusividades de masa en comparación con los modelos B y D. Este comportamiento inesperado puede explicarse en términos de los valores de equilibrio estimados (Tabla 3.2).

A partir de una inspección visual de la Figura 3.1, los valores de equilibrio de deshidratación estimados por los modelos C y D a 45 y 55 °C no siguieron de cerca el valor asintótico esperado. Se observa un comportamiento similar para los niveles de impregnación final a 55 y 65 °C para los modelos B, C y D. Por lo tanto, existe una fuerte dependencia de  $D_w$  (y presumiblemente de  $D_s$ ) en los niveles de equilibrio estimados. En el caso de  $D_s$ , sus valores se calcularon en los rangos de  $3.91 \leq D_s(A) \leq 5.43$ ,  $5.55 \leq D_s(B) \leq 7.11$ ,  $3.72 \leq D_s(C) \leq 8.03$  y  $3.21 \leq D_s(D) \leq 7.11$  ( $\times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s), pero los datos no se pueden agrupar por modelo como en los valores de  $D_w$ ; sin embargo, la rela-

ción  $D_s/D_w$  muestra una clara subestimación (alrededor de 37 a 66 %) para los modelos B, C y D en comparación con el modelo A. Todos los modelos lograron una reproducción satisfactoria de los datos experimentales ( $R^2 > 0.84, 7.4\% \leq MDR \leq 15.3\%$ ). Esta vez, no se observó un aumento evidente de los valores de  $D_s$  a lo largo de la temperatura ( $p > 0.05$ ), lo que puede explicarse por los mayores niveles de deshidratación final e impregnación observados a altas temperaturas, lo que perjudica la movilidad del soluto debido a la estructura más empaquetada provocada por el encogimiento del producto; sin embargo, la movilidad del agua no se vio afectada debido a su tamaño molecular más bajo que el de la sacarosa. Los resultados de PA y GS producidos por todos los modelos se usaron para estimar los cambios en WR, DI y la densidad del producto, que se representan en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.6. En general, el modelo de deshidratación osmótica logró una reproducción satisfactoria del comportamiento experimental con desviaciones promedio de  $5.4\% \leq MRD \leq 17.3\%$ ,  $9.2\% \leq MRD \leq 26.5\%$  y  $8.6\% \leq MRD \leq 12.4\%$  para WR, DI y densidad del producto, respectivamente.

De acuerdo con Hayes (1984), la difusividad térmica ( $\alpha$ ) de la papaya (*Carica papaya* L., Var. Solo) es  $1.52 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (23°C) o  $1.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  si se obtiene a partir de las fórmulas de composición (20°C, 0.85 kg agua/kg producto) desarrolladas por Choi & Okos (1985). Por lo tanto, según las difusividades de masa calculadas sin simplificaciones (modelo A), la conducción de calor es entre 265 y 603 veces más rápida que la difusión de agua o solutos debido a la relación  $\alpha$  a  $D$ . Esta conclusión no se ve afectada por los cambios de temperatura o humedad en el producto en las condiciones de procesamiento actuales ( $\alpha = 1.54 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  al final del proceso de deshidratación osmótica para papaya con 0.41 kg de agua/kg de producto a 65°C). Una estimación de la temperatura promedio del producto después de 1 min y 2 min de tiempo de inmersión considerando la transferencia de calor 3D por conducción

(resistencia convectiva insignificante a la transferencia de calor) da como resultado 42, 50 y 58 °C y 44, 53 y 63°C para las temperaturas de procesamiento de 45, 55 y 65°C, respectivamente. Así, la temperatura del producto alcanzó en promedio el 86 y el 95% de su cambio final después de 1 y 2 min, respectivamente. Estos resultados se reducen al 75% y 92% si se considera la resistencia convectiva. Como el primer tiempo de muestreo ocurrió a los 10 min, el análisis de transferencia de masa no se vió afectado por la suposición de un proceso de deshidratación osmótica isotérmico y es adecuado para describir la deshidratación/impregnación por coeficientes de difusión independientes de la temperatura. La suposición del proceso isotérmico se ha aplicado sin excepciones en todos los estudios relacionados con la descripción matemática de la deshidratación osmótica puesto que el acoplamiento de las ecuaciones de transferencia de masa con un modelo adicional de transferencia de calor en estado no estacionario sería innecesario de acuerdo con lo discutido anteriormente. Por lo tanto, las diferencias observadas en las difusividades de masa no pueden atribuirse a la existencia de un período de precalentamiento no considerado, sino a los supuestos de la solución de los modelos de transporte de masa (rígidos/sólidos encogibles y acoplados/desacoplados).

Además de permitir una mejor estimación de los niveles de equilibrio másico, el modelo A también mostró intervalos de confianza del 95% más estrechos que los modelos B, C y D; por lo tanto, el término asociado a la densidad ayudó a minimizar el error en la estimación de las propiedades de transferencia de masa porque el acoplamiento más fuerte entre los modelos de transporte de masa restringió el espacio de parámetros y, en consecuencia, proporcionó un mejor ajuste de los datos experimentales. Por lo tanto, se realizó un segundo procedimiento de regresión para los modelos B, C y D para estimar las difusividades másicas, donde los niveles de equilibrio se tomaron del modelo A (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Efecto de los supuestos del modelo sobre los parámetros de transferencia de masa estimados (los valores de equilibrio se preestablecieron como los obtenidos con el modelo A presentado en la Tabla 2).

Modelo	Temperatura (°C)	Parámetros de pérdida de agua*		Parámetros de ganancia de solutos*		
		$D_w \times 10^{10} (m^2/s)^{**}$	$R^2$	$D_s/D_w$	$D_s \times 10^{10} (m^2/s)^{**}$	$R^2$
B	45	7.48±0.73 (197)	0.965	1.03±0.13 (-49.5)	7.700.75 (49.9)	0.884
	55	10.9±0.62 (229)	0.963	0.60±0.03 (-49.1)	6.540.37 (67.4)	0.883
	65	16.7±3.31 (205)	0.988	0.50±0.09 (-49.5)	8.351.66 (53.9)	0.944
C	45	8.39±0.80 (233)	0.982	1.07±0.30 (-47.5)	8.980.86 (74.6)	0.955
	55	12.6±1.04 (281)	0.909	0.36±0.01 (-69.5)	4.540.37 (16.1)	0.830
	65	20.0±0.12 (265)	0.912	0.26±0.10 (-73.7)	5.200.03 (-4.20)	0.809
D	45	7.59±0.73 (201)	0.982	1.07±0.30 (-47.5)	8.120.78 (58.0)	0.955
	55	11.08±0.91 (235)	0.909	0.36±0.01 (-69.5)	3.990.33 (2.10)	0.830
	65	17.71±0.11 (223)	0.912	0.37±0.05 (-73.7)	4.600.03 (-15.1)	0.839

\*Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores entre paréntesis representan la diferencia relativa (%) con respecto a los resultados estimados con el modelo A. \*\*Valores estimados como el producto de las columnas  $D_w$  y  $D_s/D_w$ .

Los valores de  $D_w$  obtenidos bajo un nivel de equilibrio predeterminado para los modelos B, C y D todavía mostraron un efecto de sobreestimación en comparación con el modelo A (197% a 281%); sin embargo, la tendencia inesperada donde los valores de  $D_w$  para los modelos B, C y D aparecían sobrepuestos se corrigió. Esta vez, el modelo C produjo valores de  $D_w$  entre un 11 y un 20% más altos que los de los modelos B y D. Por otro lado, la relación  $D_s/D_w$  no se vio afectada en su mayor parte por los nuevos niveles de equilibrio, pero se mantuvo la tendencia en la que esta relación aumenta con la temperatura ( $p < 0.05$ ), es decir,  $D_w$  aumenta más que  $D_s$  cuando la temperatura aumenta. En general, estos resultados revelan que el efecto del término de acoplamiento en el modelo A es más fuerte que el efecto de encogimiento en la estimación de las difusividades másicas. Si bien el modelo A permite una descripción más precisa del proceso de deshidratación osmótica y la estimación de las difusividades de masa, su mayor inconveniente son los tiempos de cálculo, que eran aproximadamente dos y un órdenes de magnitud más altos que los del modelo parcialmente acoplado (modelo B) y no acoplado (modelos C y D) bajo la implementación propuesta. La estimación de las difusividades másicas durante la deshidratación osmótica de alimentos que se encogen no es tan común como en el secado, ya que impone desafíos particulares; por lo tanto, las estrategias de desacoplamiento para las ecuaciones de transporte de masa vistas en otros estudios (de Almeida Aires et al., 2018; González-Pérez et al., 2019) siguen siendo de gran valor porque permiten una descripción mucho más fácil de esta operación y pueden encontrar una adopción más amplia por la comunidad científica interesada en este tema.

### **3.3. Proceso de impregnación de compuestos bioactivos**

#### **3.3.1. Pérdida de agua y ganancia de sólidos en papaya impregnada**

La evolución de la pérdida de agua ( $\Phi_w$ ), la ganancia de soluto ( $\Phi_s$ ), reducción de peso (WR) e índice de deshidratación (DI) de los cubos de papaya impregnados con SEJS se presentan en la Figura 3.7. Se observa que las muestras de papaya perdieron alrededor de 0.30 a 0.33 g de agua/g de producto después de 360 min, mientras que exhibieron una ganancia total de soluto cercana a 0.05 a 0.09 g de soluto/g de producto y redujeron su peso en alrededor de 0.24 a 0.27 g/g de producto durante el mismo período (Figura 3.7c).

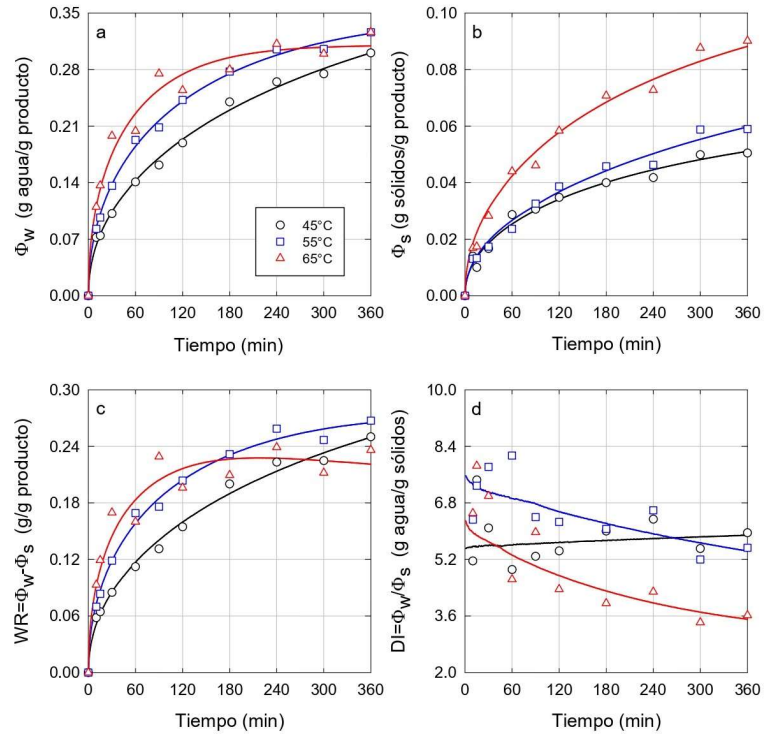


Figura 3.7. Resultados experimentales (puntos) y modelados (líneas) de (a) pérdida de agua, (b) ganancia de soluto, (c) reducción de peso, (d) e índice de deshidratación de cubos de papaya impregnados con extracto de Jamaica con sacarosa añadida.

De acuerdo a los resultados presentados anteriormente, se obtuvieron valores más altos de  $\Phi_w$  y  $\Phi_s$  (0.46-0.55 g agua/g producto y 0.17-0.30 g soluto/g producto) cuando únicamente se impregnaron cubos de papaya con jarabes de sacarosa (50°Bx) en el mismo rango de temperatura (45-65°C), con valores correspondientes de WR en los rangos de 0.20-0.38 g/g producto. Sin embargo, se logró una mayor eficiencia de deshidratación durante la impregnación de papaya con SEJS en comparación con las sumergidas en jarabes de sacarosa (3.6 a 6.0 g agua/g soluto vs. 1.6 a 3.3 g agua/g soluto) (Figura ??d).

Recientemente, Jiménez et al. (2020) realizaron un diseño compuesto central para

analizar el efecto de la temperatura (36-70°C) y la adición de sacarosa (0 a 51 g sacarosa/100 g solución) a jugo de mora (8°Bx) en la impregnación de discos de papaya verde (proporción de masa de solución a muestra de 20:1, 60 min). Estos autores informaron valores de  $\Phi_w$  y  $\Phi_s$  entre 0.16 y 0.42 g agua/g producto y entre 0.15 y 0.25 g soluto/g producto (WR entre 0.001 y 0.17 g/g de producto y DI entre 1.01 y 1.67 g/g de producto) para experimentos seleccionados realizados a 36 y 64°C con solución ajustada a 20°Bx, que son las condiciones más cercanas a las exploradas en este estudio. Las diferencias observadas se pueden atribuir al tipo de variedad (“Lucia” vs “Maradol”), estado de madurez del fruto (0% vs. 25% piel rojo-anaranjada), y la cantidad de sacarosa añadida para lograr 20°Bx en la impregnación. solución (15 vs. 16.9 g sacarosa/100 g jugo o extracto), factores que pueden afectar la transferencia de masa entre la solución y las muestras.

### 3.3.2. Características de encogimiento de los cubos de papaya impregnados

Los flujos de transferencia de masa y la pérdida de volumen de agua durante la deshidratación osmótica inducen el colapso de la estructura porosa del alimento provocando su encogimiento. En este caso, el volumen reducido de cubos de papaya mostró un comportamiento de línea recta cuando se graficó frente a la pérdida de agua (Figura 3.8), como lo describe la ecuación ( $R^2 = 0.98$ ):

$$\frac{V}{V_0} = 1 - k\Phi_w \quad (3.8)$$

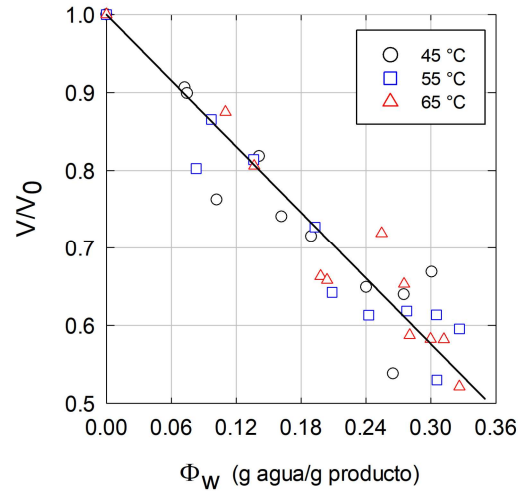


Figura 3.8. Características de encogimiento de los cubos de papaya durante la impregnación con extracto de jamaica con sacarosa añadida a diferentes temperaturas.

donde  $k = 1.41 \pm 0.07$  g p.s.p./g agua. Este modelo exhibió una desviación promedio de alrededor del 4.9% de los datos experimentales. La pendiente de la Ec. (3.8) indica que los cubos de papaya redujeron alrededor del 10% de su volumen ( $\Delta(V/V_0)$ ) por cada 0.071 g de agua eliminada por 1 g de producto sin tratar ( $\Delta\Phi_w$ ). Por lo tanto, los cubos de papaya perdieron un poco más del 40% de su volumen inicial durante los experimentos de impregnación para una pérdida de agua final cercana a 0.3 g agua/g producto. El encogimiento actual fue más severo que lo observado durante la osmodeshidratación de cubos de papaya en jarabe de sacarosa (50°Bx, 45-65°C), donde  $V/V_0$  no exhibió un comportamiento de línea recta cuando se gráfico contra  $\Phi_w$ . En este último caso, los cubos de papaya requirieron una pérdida de agua del orden de 0.52 g agua/g producto para reducir su volumen inicial en un 40% (con cambios de  $\Delta\Phi_w = 0.195, 0.134, 0.113, 0.106, \text{ y } 0.101$  g agua/g producto cuando  $\Phi_w = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$

y 0.5 g agua/g producto para  $\Delta(V/V_0) = 0.1$  respectivamente). Se considera que la mayor ganancia de solutos en los cubos de papaya tratados con soluciones de sacarosa 50°Bx, que triplica los valores actuales, contribuyó a rigidizar la matriz alimentaria, aumentando su resistencia al encogimiento.

### **3.3.3. Impregnación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en cubos de papaya**

La Figura 3.9 muestra los cambios en el contenido de bioactivos (CFT y ANT) y capacidad antioxidante (CAT) de los cubos de papaya impregnados a las tres temperaturas ensayadas, observándose un incremento de estas variables en todos los casos.

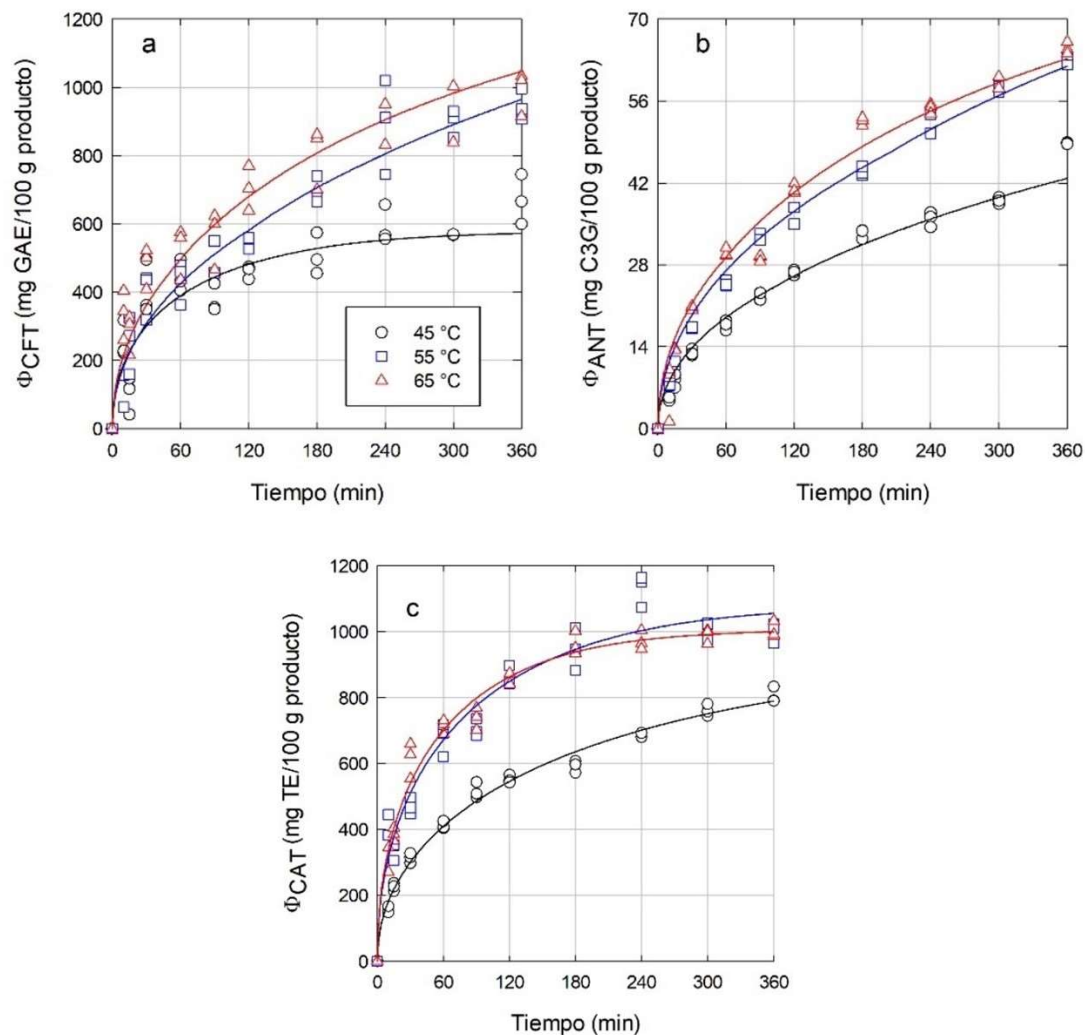


Figura 3.9. Evolución experimental (puntos) y predicha (líneas) de (a) compuestos fenólicos totales, (b) antocianinas totales y (c) capacidad antioxidante total durante la impregnación de papaya con extracto de jamaica con sacarosa añadida.

Después de 360 min, los cubos de papaya impregnados con SEJS aumentaron su CFT, ANT y CAT en aproximadamente 670-990 mg GAE/100 g b.h., 48.8-65.0 mg C3G/100 g b.h., 805-1004 mg TE/100 g b.h. a partir de  $402 \pm 53$  mg GAE/100 g b.h., 0 mg C3G/100 g b.h. y  $679 \pm 62$  mg TE/100 g b.h. en materia prima, respectivamente.

Se determinó que los valores correspondientes en la solución de impregnación fueron  $688 \pm 18$  mg GAE/100 g b.h.,  $38.9 \pm 5.2$  mg C3G/100 g b.h. y  $1694 \pm 40$  mg TE/100 g b.h. (Tabla 3.1). Los valores de CFT y ANT están altamente correlacionados con la CAT, mostrando valores  $r$  de Pearson superiores a 0.95; por lo tanto, los compuestos fenólicos y las antocianinas pueden considerarse los principales componentes que contribuyen al aumento del potencial de eliminación de radicales de la papaya impregnada con SEJS. De acuerdo con los resultados anteriores, los compuestos fenólicos y las antocianinas de la flor de Jamaica son más afines al tejido de la papaya, ya que lograron una concentración ligeramente mayor en la fruta que en la solución, por lo tanto, una mayor capacidad antioxidante. Un resultado similar obtuvo Jiménez et al. (2020) mientras producían papaya impregnada de antocianinas con jugo de mora adicionado con sacarosa logrando valores de impregnación que van desde 21.1 a 70.4 mg GAE/100 g b.h., este último valor también muestra una concentración de antocianinas mayor que la solución de partida (62.5 mg C3G/100 g b.h.). Como el equilibrio de masa no implica que se logre la misma concentración en las fases involucradas, el análisis detallado de su comportamiento en sistemas sólido-líquido requiere experimentos realizados a diferentes concentraciones, temperaturas y relaciones de masa de las fases involucradas como se ha visto en otros estudios (Castillo-Santos et al., 2017; Zhang & Liu, 2021). Las características de color de los cubos de papaya impregnados se presentan en la Figura 3.10. La muestra pasa de un color naranja a diferentes tonos de rojo, con una transición más rápida hacia un tono más oscuro a la temperatura alta.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)		
	45°C	55°C	65°C
0	(52, 26, 40) ± (6, 1, 2)	(52, 26, 40) ± (6, 1, 2)	(52, 26, 40) ± (6, 1, 2)
5	(36, 43, 27) ± (5, 6, 3)	(31, 37, 18) ± (1, 3, 2)	(32, 34, 18) ± (2, 3, 2)
10	(29, 38, 17) ± (1, 2, 3)	(26, 35, 11) ± (2, 3, 3)	(25, 32, 6) ± (2, 5, 3)
15	(28, 37, 14) ± (1, 0, 2)	(25, 31, 7) ± (2, 2, 4)	(22, 23, 5) ± (2, 2, 2)
20	(23, 23, 5) ± (1, 2, 2)	(23, 20, 5) ± (1, 3, 2)	(21, 17, 3) ± (3, 4, 3)
30	(25, 25, 3) ± (2, 4, 1)	(23, 21, 21) ± (0, 2, 3)	(25, 12, 1) ± (1, 4, 1)
60	(23, 26,4) ± (0, 6, 0)	(22, 21, 2) ± (1, 1, 3)	(23, 18, 3) ± (0, 2, 2)
90	(22, 21, 0) ± (1, 1, 3)	(23, 19, -2) ± (0, 0, 0)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
120	(21, 21,2) ± (1, 1, 2)	(24, 12, -1) ± (2, 3, 4)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
180	(23, 16, -1) ± (2, 5, 2)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
240	(23, 10, 1.5) ± (3, 1, 0)	(21, 10, 2) ± (2, 0, 0)	(21, 6, 2) ± (2, 2, 1)
360	(23, 10, 1.5) ± (3, 1, 0)	(21, 10, 2) ± (2, 0, 0)	(21, 6, 2) ± (2, 2, 1)

Figura 3.10. Características de color de cubos de papaya impregnados con extracto de jamaica con sacarosa añadida. Los números dentro de las celdas son los valores de color CIELAB (media ± S.D.).

Dinçer (2021) aplicó EJ hipotónico (1°Bx) para producir manzanas impregnadas de antocianina (cubos de 12 mm, 25 °C, relación de solución a masa de fruta de 19:1) en condiciones de vacío, logrando una ganancia de antocianina de aproximadamente  $1.81 \pm 0.40$  mg C3G/100 g b.h. en el tratamiento de control realizado a presión atmosférica después de 30 min. En este estudio, la papaya logró una ganancia de antocianinas de

alrededor de 13.0 a 21.6 mg C3G/100 g b.h. después del mismo período de impregnación. Las diferencias en los niveles de impregnación de antocianinas pueden explicarse por el uso de una temperatura mayor (45-65 °C frente a 25 °C) y la concentración de bioactivos iniciales de la solución de impregnación ( $38.9 \pm 5.2$  mg C3G/100 g b.h. frente a 11.8 mg C3G/100 ml) utilizado en este estudio. Hernández-Carranza et al. (2022) impregnaron gajos de manzana (octavos) con SEJS (30-50°C, 50 °Bx) obteniendo una ganancia de compuestos fenólicos y de capacidad antioxidante del orden de 42 a 57 mg GAE/100 g b.h. y de 11 a 63 mg TE/100 b.h. después de 480 minutos; pero las muestras eran mucho más grandes que las utilizadas en este estudio ( $15 \pm 1$  g frente a  $3.4 \pm 0.1$  g), lo que contribuyó a una transferencia de bioactivos significativamente menor (el tiempo para el nivel de impregnación deseado exhibe un crecimiento cuadrático cuando el tamaño se duplica sin cambiar la forma de acuerdo con la teoría de la difusión). Maleki et al. (2019) utilizaron una SEJS (40, 50 o 60% de sacarosa en peso) para impregnar rodajas de zanahoria (0.5 cm de espesor, 50°C, proporción de solución a masa de fruto de 20:1) sometidas o no a un pretratamiento de ultrasonido (25 kHz, 500 W, 0-20 min). Los autores lograron un producto osmodeshidratado con un contenido de CFT de alrededor de 65 mg/100 g b.h. después de 120 min sin US y encontraron que la sonicación tuvo un efecto negativo en la impregnación de fenoles. Este último valor es muy inferior al alcanzado en este estudio; sin embargo, el EJ original presumiblemente tenía un contenido fenólico mucho más bajo incluso antes de la adición de sacarosa, ya que la extracción de bioactivos se llevó a cabo con una proporción de agua y Jamaica de 40:1 (agua hirviendo, 15 min). Como fuente de bioactivos la SJES se compara favorablemente con otros medios de impregnación. Por ejemplo, de de Medeiros et al. (2019) utilizaron un extracto de orujo de uva rico en compuestos fenólicos (155 mg GAE/100 ml) para impregnar rodajas de mango (3 cm

de ancho y 5 cm de largo) aumentando su contenido fenólico alrededor de 53 a 86 mg GAE/100 g b.h. a partir de 24 mg GAE/100 g b.h. en materia prima.

### **3.3.4. Análisis de transferencia de masa del proceso de impregnación de papaya**

El modelo de difusión propuesto reprodujo satisfactoriamente el comportamiento experimental de las variables investigadas, con desviaciones relativas entre el 2 y el 35 % (11 % en promedio). Los coeficientes de difusión para agua, sólidos totales, CFT, ANT y CAT se estimaron en rangos de  $0.36-12.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  considerando la reducción continua de tamaño de los cubos de papaya (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Parámetros de transferencia de masa estimados durante la impregnación de cubos de papaya con extracto de Jamaica con sacarosa añadida.

Sustancia	Temperatura (°C)	$D \times 10^{-10}$ (m <sup>2</sup> /s) <sup>a</sup>	$\Phi_e$ <sup>ab</sup>	MRD(%)	$R^2$
Agua	45	1.76 ± 1.01 <sup>A</sup>	(4.28 ± 0.90) × 10 <sup>-1</sup> <sup>A</sup>	3.20	0.996
	55	5.29 ± 1.04 <sup>B</sup>	(3.49 ± 0.19) × 10 <sup>-1</sup> <sup>A</sup>	2.02	0.997
	65	12.6 ± 4.62 <sup>C</sup>	(3.10 ± 0.22) × 10 <sup>-1</sup> <sup>B</sup>	5.15	0.976
Sólidos totales	45	2.54 ± 2.41 <sup>A</sup>	(0.65 ± 0.21) × 10 <sup>-1</sup> <sup>A</sup>	8.44	0.983
	55	0.90 ± 0.00 <sup>A</sup>	(1.05 ± 0.06) × 10 <sup>-1</sup> <sup>B</sup>	6.10	0.987
	65	1.80 ± 1.78 <sup>A</sup>	(1.22 ± 0.43) × 10 <sup>-1</sup> <sup>B</sup>	7.10	0.989
CFT	45	10.8 ± 8.00 <sup>A</sup>	578 ± 90 <sup>A</sup>	33.1	0.755
	55	0.65 ± 0.00 <sup>B</sup>	1930 ± 120 <sup>B</sup>	16.1	0.950
	65	1.62 ± 0.01 <sup>C</sup>	1490 ± 80 <sup>C</sup>	12.2	0.929
ANT	45	0.80 ± 0.00 <sup>A</sup>	80.2 ± 2.4 <sup>A</sup>	10.2	0.989
	55	0.36 ± 0.00 <sup>B</sup>	160 ± 5.3 <sup>B</sup>	9.49	0.991
	65	1.32 ± 0.01 <sup>C</sup>	96.3 ± 3.0 <sup>C</sup>	35.4	0.975
CAT	45	3.31 ± 0.86 <sup>A</sup>	929 ± 75 <sup>A</sup>	4.17	0.991
	55	8.23 ± 2.50 <sup>B</sup>	1079 ± 74 <sup>B</sup>	8.10	0.959
	65	11.1 ± 1.80 <sup>C</sup>	1006 ± 32 <sup>A</sup>	4.36	0.984

<sup>a</sup> Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores para una columna y sustancia difusora seguidos de la misma letra mayúscula no son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>b</sup>  $\Phi_e$  en g/g, <sup>c</sup>  $\Phi_e$  en mg GAE/100 g, <sup>d</sup>  $\Phi_e$  en mg C3G/100 g, <sup>e</sup>  $\Phi_e$  en mg TE/100 g.

Las difusividades del agua se estimaron en el rango de  $1.76 \times 10^{-10} - 12.6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, mientras que sus valores de equilibrio ( $\Phi_{we}$ ) variaron entre 0.31 a 0.43 g agua /g producto. Por otro lado, las difusividades de los sólidos se estimaron entre  $0.90 \times 10^{-10}$  y  $2.54 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s con valores de equilibrio ( $\Phi_{se}$ ) de 0.07-0.12 g sólidos/g producto). En ambos casos los valores fueron inferiores a los estimados previamente para papaya impregnada con soluciones de sacarosa (50°Bx) a las mismas temperaturas para difusividad de agua ( $6.5 \times 10^{-10}$  a  $18.3 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) y  $\Phi_{we}$  (0.47 a 0.55 g agua/g producto) y para difusividad de sólidos ( $6.77 \times 10^{-10}$  a  $7.11 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) y  $\Phi_{se}$  (0.18-0.30 g sólidos/g producto) (Aguirre-García et al., 2022). Este comportamiento se ha observado en varios estudios (Adsare et al., 2016; de Farias Aires et al., 2017; Etemadi et al., 2020), ya que se sabe que las difusividades de masa y los niveles de deshidratación/impregnación aumentan a lo largo del gradiente de presión osmótica, que a su vez depende de la concentración de la solución (Ade-Omowaye et al., 2002). Además, el comportamiento de encogimiento más drástico de los cubos de papaya impregnados con SEJS también podría contribuir a un colapso más severo de la microestructura de los alimentos y una movilidad reducida de las sustancias que se difunden.

Cabe destacar que la estimación de la difusividad es muy sensible a los valores de equilibrio asignados: un cambio de 2 a 47% en los valores de equilibrio produce una variación de 8 a 55% en las difusividades estimadas de agua y soluto, de acuerdo con a los resultados mostrados en la Tabla 3.4. Sin embargo, la estimación de los valores de equilibrio por sí solos es una tarea compleja en escenarios donde las curvas de proceso no alcanzan claramente un comportamiento asintótico. Dinger (2021) reportó valores de equilibrio que varían entre 4.2 a 126% dependiendo del modelo de estimación elegido (difusión de Fickian, Azuara o Peleg) para agua y antocianinas en manzana impregnada con extracto de Jamaica. Por su parte, las difusividades de las antocianinas de flor de

Jamaica en tejido de papaya se encontraron en el rango de  $0.36 \times 10^{-10}$  a  $1.32 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , que son más bajas que las reportadas para la manzana impregnada con EJ a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  bajo presión atmosférica e impregnación al vacío ( $4.3 \times 10^{-10}$  –  $16.8 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ). Por lo tanto, la falta de un efecto claro de la temperatura sobre las difusividades estimadas de sólidos, CFT y ANT podría deberse a la menor precisión de la estimación del equilibrio en estos casos, causada por la variabilidad experimental inherente o la información temporal insuficiente para lograr este propósito. No es posible una comparación justa de los resultados de los compuestos bioactivos con otros estudios debido a las diferencias en los procesos (por ejemplo, presión atmosférica o de vacío), matrices de alimentos (índice de madurez, textura, porosidad, tortuosidad, etc.) y soluciones de impregnación (concentración, naturaleza química de sustancias difusoras, etc.). Por su parte, las difusividades de las antocianinas de flor de Jamaica en tejido de papaya se encontraron en el rango de  $0.36 \times 10^{-10}$  a  $1.32 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , que son más bajas que las reportadas para la manzana impregnada con EJ a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  bajo presión atmosférica e impregnación al vacío ( $4.3 \times 10^{-10}$  –  $16.8 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ). De manera similar, las difusividades de antocianina de kokum en la grosella espinosa india se han determinado en el rango de  $7.1 \times 10^{-10}$  a  $11.4 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$  (Adsare et al., 2016). En ambos casos, las mayores difusividades pueden explicarse por la falta de inclusión del encogimiento en el modelo de transferencia de masa. En cuanto a los CFT, sus coeficientes de difusión oscilaron entre  $0.65 \times 10^{-10}$  y  $10.8 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , mientras que los de CAT oscilaron entre  $3.31 \times 10^{-10}$  y  $11.1 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Estos valores son superiores a los estimados durante la impregnación de gajos de manzana (de  $1.72 \times 10^{-11}$  a  $6.05 \times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$  para CFT y de  $0.86 \times 10^{-11}$  a  $2.34 \times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$  para CAT con jugo de remolacha estandarizado (50 °Bx, 30-50 °C), incluso si fueron corregidos por encogimiento (Aguirre-García et al., 2022). Se produjo una sobreestimación de alrededor del 11 al 33% ( $23.0 \pm 5.8\%$ )

cuando se ignoró el encogimiento en el análisis, hecho que concuerda con estudios previos (Aguirre-García et al., 2020). Las difusividades másicas para otros compuestos bioactivos pueden ser más altas que las reportadas aquí, lo cual era algo esperado debido a la falta de contracción en el modelo de transferencia de masa, como se vio anteriormente para los gingeroles en mango ( $15.1 \times 10^{-10}$  a  $35.7 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s)(Shukla et al., 2019), o podría estar en el mismo orden de magnitud incluso si se excluyera la contracción del análisis, como se vio para las difusividades de los curcuminoides en el coco ( $0.65 \times 10^{-10}$  a  $10.8 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) (Bellary & Rastogi, 2012; Bellary et al., 2011). Por lo tanto, se requieren más estudios que permitan una mejor comprensión de los mecanismos subyacentes que rigen la impregnación de bioactivos.

### **3.3.5. Pérdida de agua y ganancia de sólidos en piña impregnada**

En la Figura 3.11 se muestra la evolución de la pérdida de agua ( $\Phi_w$ ), ganancia de soluto ( $\Phi_s$ ), reducción de peso (WR) e índice de deshidratación (DI) de las secciones de cilindro anular de piña impregnados con SEJS. Las muestras de piña perdieron alrededor de 0.28 a 0.37 g de agua/g de producto después de 360 min, mientras que exhibieron una ganancia total de soluto cercana a 0.056 a 0.061 g soluto/g producto. Asimismo, redujeron su peso alrededor de 0.23 a 0.31 g/g de producto (Figura 3.11c). y alcanzaron un índice de deshidratación de 5.0-6.0 g agua/g soluto durante el mismo período (Figura 3.11d).

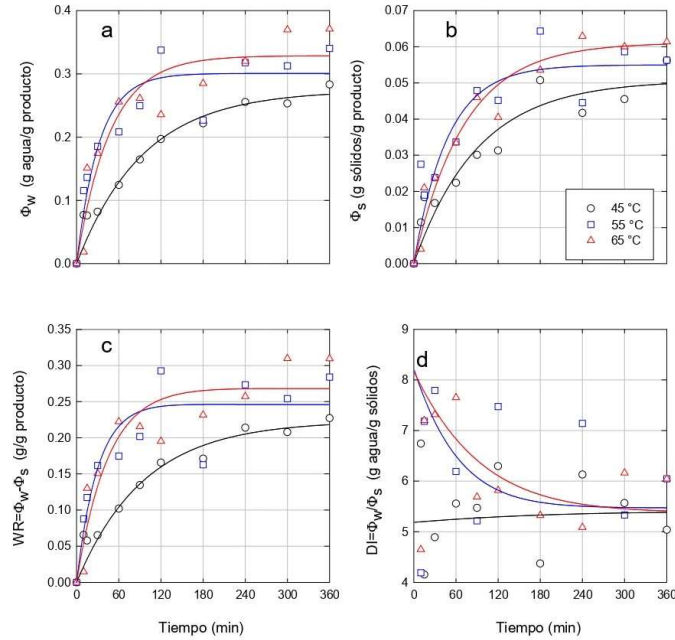


Figura 3.11. Resultados experimentales (puntos) y modelados (líneas) de (a) pérdida de agua, (b) ganancia de soluto, (c) reducción de peso, (d) e índice de deshidratación de piña impregnada con extracto de Jamaica con sacarosa añadida.

Le & Konsue (2021) obtuvieron valores similares para la  $\Phi_{we}$  (0.21-0.25 g de agua /g producto); sin embargo, reportaron valores más altos de  $\Phi_{se}$  (0.11-0.15 g de soluto /g producto), lo que puede deberse a la mayor concentración de la solución osmótica (55 y 65°Bx). Respecto a los valores obtenidos de reducción de peso e índice de deshidratación fueron más altos al impregnar la piña con SEJS en comparación con utilizar solución de sacarosa (WR = 0.1-0.12 g/g producto y DI = 2.0-2.1 g agua/g soluto) (Le & Konsue, 2021). Salazar-López et al. (2015) reportaron valores de valores  $\Phi_{we}$  y  $\Phi_{se}$  de  $0.34 \pm 0.02$  g agua/g fruta fresca y  $0.09 \pm 0.01$  g sólidos/g fruta fresca, respectivamente, al impregnar discos de piña con una emulsión de oleoresina de chile piquín y goma arábiga (40°C, 120 min).

### 3.3.6. Características de encogimiento de las secciones de cilindro anular de piña impregnadas

En la figura 3.12 se muestra el comportamiento lineal de la pérdida de agua *versus* la pérdida de volumen a las diferentes temperaturas del proceso de impregnación, debido al colapso de la estructura de la piña provocando su encogimiento a medida que pierde agua (de Lima et al., 2016; Ramallo et al., 2013; Ramallo & Mascheroni, 2012). En este caso, el volumen reducido de las muestras de piña se describe con la siguiente ecuación ( $R^2 = 0.73$ ):

$$\frac{V}{V_0} = 1 - k\Phi_w \quad (3.9)$$

donde  $k = 1.179$  g p.s.p / g agua (intervalo de confianza 95%). Las muestras de piña perdieron un poco más del 40% de su volumen inicial durante los experimentos de impregnación para una pérdida de agua final cercana a 0.36 g agua/g producto. Ramallo et al. (2013) obtuvieron valores comparables (35%) al deshidratar osmóticamente rodajas de piña ( $6.0 \pm 0.5$  mm de grosor y  $115 \pm 5$  mm de diámetro) en una solución de sacarosa (60°Bx, 40°C).

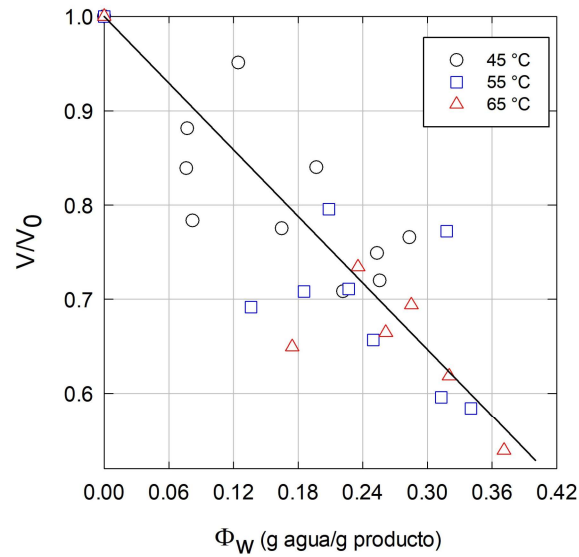


Figura 3.12. Características de encogimiento de piña durante su impregnación con extracto de Jamaica con sacarosa añadida a diferentes temperaturas.

### 3.3.7. Impregnación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en secciones de cilindro anular de piña

La Figura 3.13 muestra la evolución del contenido bioactivos (CFT y ANT) y la capacidad antioxidante (CAT) de las muestras de piña impregnadas a las tres temperaturas propuestas, donde es evidente el incremento de los compuestos en todos los casos.

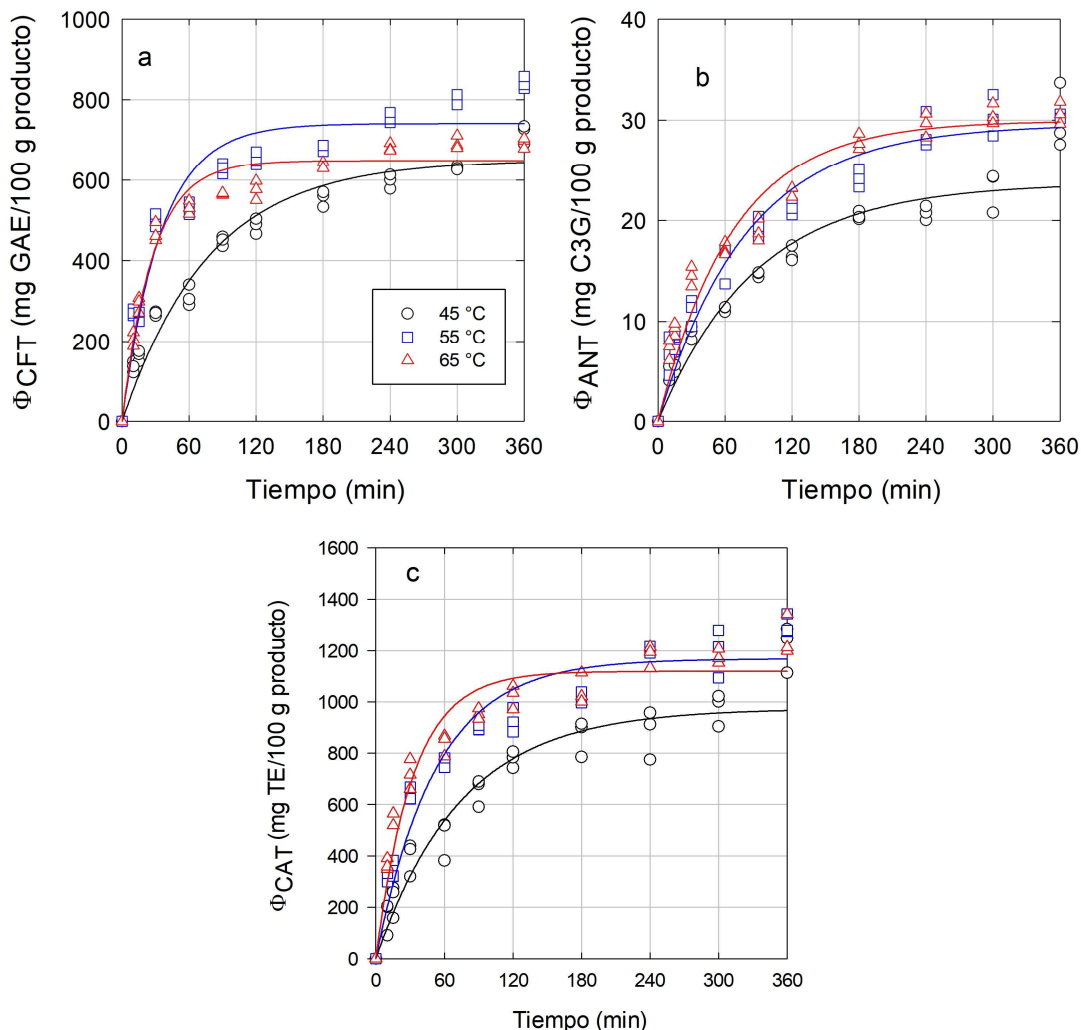


Figura 3.13. Evolución experimental (puntos) y predicha (líneas) de (a) compuestos fenólicos totales, (b) antocianinas totales y (c) capacidad antioxidante total durante la impregnación de piña con extracto de Jamaica con sacarosa añadida.

Después de 360 min, las muestras impregnadas con SEJS aumentaron su CFT, ANT y CAT en aproximadamente 613-838 mg GAE/100g b.h., 27.5-37.7 mg C3G/100 g b.h. y 1114-1343 mg TE/100 g b.h a partir de  $373 \pm 26$  mg GAE/100 g b.h., 0 mg C3G/100 g b.h. y  $506 \pm 30$  mg TE/100 g b.h. en materia prima, respectivamente. Se determinó que los valores correspondientes en la solución de impregnación fueron  $688 \pm 18$  mg

GAE/100 g b.h.,  $38.9 \pm 5.2$  mg C3G/100 g b.h. y  $1694 \pm 40$  mg TE/100 g b.h. (Tabla 3.1). Los valores de CFT y ANT están altamente correlacionados con CAT, mostrando valores  $r$  de Pearson superiores a 0.95. Hasta el momento los trabajos reportados sobre impregnación de piña se han enfocado en utilizar solutos como cloruro de calcio, lactato de calcio, ácido ascórbico, azúcar invertido, sacarosa y emulsiones con el objetivo de fortificar y mejorar sus propiedades mecánicas (Berbert et al., 2016; de Lima et al., 2016; Fernández et al., 2019; Ramallo et al., 2013; Salazar-López et al., 2015; Silva et al., 2013). Por lo tanto, no hay punto de comparación en cuanto a la ganancia de los compuestos bioactivos impregnados en este estudio. Sin embargo, Salazar-López et al. (2015) evaluaron la retención de  $\beta$ -caroteno después de impregnar piña con emulsión (chile piquin-goma arábica) que posteriormente liofilizaron partiendo de  $300.48 \pm 3.5$   $\mu\text{g}/100$  g piña fresca, alcanzando un valor de  $3221.22 \pm 8.4$   $\mu\text{g}/100$  g en el producto seco. Las características de color de las secciones de cilindro anular de piña impregnadas se presentan en la Figura 3.14. Las muestras pasan de un color amarillo a diferentes tonos de rosa-rojo con una transición más rápida hacia un tono rojo más oscuro a la temperatura alta a medida que avanza el proceso de impregnación.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)		
	45°C	55°C	65°C
<b>0</b>	(80,-3, 26) ± (1, 1, 0)	(80,-3, 26) ± (1, 1, 0)	(80,-3, 26) ± (1, 1, 0)
<b>5</b>	(51, 41, 25) ± (2, 8, 8)	(52, 36, 19) ± (0, 0, 0)	(48, 38, 20) ± (7, 3, 2)
<b>10</b>	(52, 42, 20) ± (0, 9, 1)	(39, 54, 31) ± (1, 0, 2)	(25, 32, 6) ± (2, 5, 3)
<b>20</b>	(48, 38, 20) ± (7, 3, 2)	(37, 51, 24) ± (2, 6, 3)	(22, 23, 5) ± (2, 2, 2)
<b>30</b>	(38, 47, 24) ± (2, 1, 2)	(33, 50, 21) ± (0, 0, 0)	(21, 17, 3) ± (3, 4, 3)
<b>60</b>	(35, 51, 22) ± (1, 1, 2)	(29, 43, 12) ± (2, 8, 1)	(25, 12, 1) ± (1, 4, 1)
<b>90</b>	(35, 44,19) ± (6, 3, 5)	(29, 43, 12) ± (2, 8, 1)	(23, 18, 3) ± (0, 2, 2)
<b>120</b>	(33, 41, 17) ± (3, 1, 2)	(30, 49, 11) ± (0, 0, 0)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
<b>180</b>	(31, 45,13) ± (1, 5, 3)	(27, 37,13) ± (0, 0, 0)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
<b>240</b>	(31, 38, 11) ± (1, 6, 7)	(28, 33, 8) ± (1, 2, 6)	(20, 9, 2) ± (0, 0, 0)
<b>300</b>	(28, 34, 12) ± (1, 4, 1)	(23, 32, 8) ± (0, 3, 5)	(21, 6, 2) ± (2, 2, 1)
<b>360</b>	(30, 28, 8) ± (3, 9, 6)	(25, 28, 6) ± (3, 9, 3)	(21, 6, 2) ± (2, 2, 1)

Figura 3.14. Características de color de secciones de cilindro anular de piña impregnadas. Los números dentro de las celdas son los valores de color CIELAB (media ± S.D.).

### **3.3.8. Análisis de transferencia de masa del proceso de impregnación de piña**

El modelo de difusión propuesto reprodujo satisfactoria el comportamiento experimental de las variables investigadas Figuras 3.11 y 3.13. Los coeficientes de difusión para agua, sólidos totales, CFT, ANT y CAT se estimaron en rangos de  $0.01-0.09 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (Tabla 3.4).

Tabla 3.5. Parámetros de transferencia de masa estimados durante la impregnación de sección de cilindro anular de piña con *SEJS*.

Sustancia	Temperatura (°C)	$D \times 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s) <sup>a</sup>	$\Phi_e$ <sup>ab</sup>	MRD(%)	R <sup>2</sup>
Agua	45	0.043±0.02 <sup>A</sup>	0.27 ± 0.04 <sup>A</sup>	14.2	0.9493
	55	0.013±0.07 <sup>B</sup>	0.30 ± 0.04 <sup>A</sup>	15.0	0.8765
	65	0.085±0.05 <sup>C</sup>	0.33 ± 0.05 <sup>A</sup>	36.7	0.8974
Sólidos totales	45	0.044±0.03 <sup>A</sup>	0.051 ± 0.01 <sup>A</sup>	20.6	0.8942
	55	0.084 ± 0.005 <sup>B</sup>	0.055 ± 0.01 <sup>A</sup>	17.2	0.8395
	65	0.060±0.02 <sup>C</sup>	0.061 ± 0.01 <sup>B</sup>	19.9	0.9554
CFT	45	0.052±0.09 <sup>A</sup>	650 ±35 <sup>A</sup>	13.5	0.9622
	55	0.012 ± 0.02 <sup>B</sup>	741 ± 35 <sup>B</sup>	11.3	0.9357
	65	0.015 ± 0.02 <sup>B</sup>	648 ± 21 <sup>A</sup>	7.02	0.9645
ANT	45	0.046 ± 0.01 <sup>A</sup>	23.7±2.36 <sup>A</sup>	15.7	0.9091
	55	0.051 ± 0.02 <sup>B</sup>	29.5±2.25 <sup>B</sup>	14.8	0.9319
	65	0.061 ± 0.01 <sup>B</sup>	29.9±1.65 <sup>B</sup>	14.3	0.9499
CAT	45	0.054 ± 0.01 <sup>A</sup>	974±81 <sup>A</sup>	14.7	0.9235
	55	0.077 ± 0.01 <sup>B</sup>	1168±61 <sup>B</sup>	12.8	0.9443
	65	0.013 ± 0.04 <sup>C</sup>	1119±94 <sup>B</sup>	12.1	0.7884

<sup>a</sup> Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores para una columna y sustancia difusora seguidos de la misma letra mayúscula no son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>b</sup>  $\Phi_e$  en g/g. <sup>c</sup>  $\Phi_e$  en mg GAE/100 g. <sup>d</sup>  $\Phi_e$  en mg C3G/100 g. <sup>e</sup>  $\Phi_e$  en mg TE/100 g.

Las difusividades del agua se estimaron en el rango de  $0.01\text{-}0.085 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, mientras que sus valores de equilibrio ( $\Phi_{we}$ ) variaron entre 0.27 a 0.33 g agua /g producto. Por otro lado, las difusividades de los sólidos se estimaron entre  $0.044\text{-}0.084 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s con valores de equilibrio ( $\Phi_{se}$ ) de 0.051-0.061 g sólidos/g producto. La ecuación de difusión en estado no estacionario proporcionó una reproducción satisfactoria del

proceso combinado de impregnación-OD de compuestos bioactivos de las rebanadas de piña ( $0.79 \leq R^2 \leq 0.96$ ).

### 3.4. Proceso de fritura

En las Tablas 3.6-3.8 se muestra el contenido de CFT, ANT y CAT de papaya y piña pretratados con DO/impregnación con soluciones de sacarosa (OD-S) y solución de extracto de Jamiaca-sacarosa (OD-JS) a 65°C durante 6h, que posteriormente se sometieron al proceso de fritura con aire caliente a 180°C durante 10 min.

Tabla 3.6. Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto fresco.

	Papaya			Piña		
Tratamiento	CFT (mgGAE/g p.f) <sup>a</sup>	ANT (mgC3G/g p.f) <sup>a</sup>	CAT (mgTE/g p.f) <sup>a</sup>	CFT (mgGAE/g p.f) <sup>a</sup>	ANT (mgC3G/g p.f) <sup>a</sup>	CAT (mgTE/g p.f) <sup>a</sup>
Fresco	4.0±0.5 <sup>A</sup>	-	6.8±0.6 <sup>A</sup>	3.7±0.3 <sup>A</sup>	-	5.1±0.0 <sup>A</sup>
OD-S	5.2±0.6 <sup>B</sup>	5.3±0.6 <sup>A</sup>	15±0.4 <sup>B</sup>	14±0.6 <sup>B</sup>	8.4±5.6 <sup>A</sup>	16±0.5 <sup>A</sup>
OD-JS	20±0.6 <sup>C</sup>	63±4.8 <sup>B</sup>	238±11 <sup>C</sup>	22±1.9 <sup>C</sup>	73±7.5 <sup>B</sup>	291±0.5 <sup>A</sup>
OD-S-F	11±1.7 <sup>D</sup>	5.7±2.4 <sup>A</sup>	17±1.1 <sup>B</sup>	7.2±0.2 <sup>D</sup>	2.5±1.4 <sup>A</sup>	14±0.5 <sup>A</sup>
OD-JS-F	19±0.6 <sup>C</sup>	57±9.6 <sup>B</sup>	109±13 <sup>D</sup>	27±1.6 <sup>E</sup>	59±8.5 <sup>B</sup>	277±8.8 <sup>A</sup>

<sup>a</sup> Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%.

Para las muestras de papaya pretratadas con SEJS se observa que los CFT y ANT permanecieron constantes después del proceso de fritura a diferencia de la CAT que disminuyeron considerablemente. Esta disminución se asocia a la degradación de otros compuestos antioxidantes, sensibles a la temperatura, presentes de forma natural en la papaya (carotenoides, ácido ascorbico, licopeno, β-criptoxantinas, entre otros) (Colle et al., 2010; Dima et al., 2019; Herbig & Renard, 2017). En cuanto a las muestras de piña impregnadas con SEJS la CAT y ANT no presentaron diferencias significativas después del proceso de fritura. Respecto, a los cubos de papaya pretratados con so-

lución de sacarosa presentan un incremento en cuanto a los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante esto puede asociarse a la presencia de sustancias que interfieren en la su determinación como la sacarosa (en concentraciones más altas del 10%) que pueden reaccionar con el reactivo Folín-Ciocalteou y ser erróneamente cuantificables (Lee et al., 2014; Prior et al., 2005).

En la Tabla 3.7 se muestran los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de los productos analizados expresados respecto al producto impregnado donde se observa la misma tendencia que los reportados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.7. Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto impregnado.

Tratamiento	Papaya			Piña		
	CFT (mgGAE/g p.imp.) <sup>a</sup>	ANT (mgC3G/g p.imp.) <sup>a</sup>	CAT (mgTE/g p.imp.) <sup>a</sup>	CFT (mgGAE/g p.imp.) <sup>a</sup>	ANT (mgC3G/g p.imp.) <sup>a</sup>	CAT (mgTE/g p.imp.) <sup>a</sup>
OD-S	5.1±0.5 <sup>A</sup>	5.3±2.8 <sup>A</sup>	14±0.4 <sup>A</sup>	19±2.0 <sup>A</sup>	11±7.7 <sup>A</sup>	22±0.5 <sup>A</sup>
OD-JS	25±0.8 <sup>B</sup>	79±6.1 <sup>B</sup>	299±13 <sup>B</sup>	33±2.8 <sup>B</sup>	109±11 <sup>B</sup>	435±14 <sup>B</sup>
OD-S-F	10±1.6 <sup>C</sup>	5.6±2.4 <sup>A</sup>	17±1 <sup>A</sup>	10±0.2 <sup>C</sup>	3.5±2.0 <sup>A</sup>	19±1.2 <sup>A</sup>
OD-JS-F	24±1.0 <sup>B</sup>	71±12 <sup>B</sup>	137±16 <sup>C</sup>	41±2.5 <sup>D</sup>	91±13 <sup>B</sup>	426±13 <sup>B</sup>

<sup>a</sup> Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores para una columna y sustancia difusora seguidos de la misma letra mayúscula no son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

En la Tabla 3.8 se muestran los compuestos bioactivos (CFT y ANT) y capacidad antioxidante de los extractos de papaya y piña procesadas expresados respecto al producto frito.

Tabla 3.8. Comparación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de papaya y piña pretratadas después de freír respecto al producto frito.

	Papaya			Piña		
Tratamiento	<i>CFT</i> (mg GAE/g p.frito.) <sup>a</sup>	<i>ANT</i> (mg C3G/g p.frito) <sup>a</sup>	<i>CAT</i> (mg TE/g p.frito) <sup>a</sup>	<i>CFT</i> (mg GAE/g p.frito) <sup>a</sup>	<i>ANT</i> (mg C3G/g p.frito) <sup>a</sup>	<i>CAT</i> (mg TE/g p.frito) <sup>a</sup>
OD-S	5.1±0.5 <sup>A</sup>	5.3±2.8 <sup>A</sup>	14±0.4 <sup>A</sup>	19±2.0 <sup>A</sup>	11±7.7 <sup>A</sup>	22±0.5 <sup>A</sup>
OD-J	25±0.8 <sup>B</sup>	79±6.1 <sup>B</sup>	299±13 <sup>B</sup>	33±2.8 <sup>B</sup>	109±11 <sup>B</sup>	435±14 <sup>B</sup>
OD-S-F	18±2.8 <sup>C</sup>	9.5±4.0 <sup>A</sup>	29±1.9 <sup>A</sup>	17±0.4 <sup>A</sup>	6.1±3.5 <sup>A</sup>	33±2.1 <sup>A</sup>
OD-J-F	40±1.7 <sup>D</sup>	120±20 <sup>C</sup>	232±27 <sup>C</sup>	73±4.4 <sup>C</sup>	161±23 <sup>C</sup>	757±24 <sup>C</sup>

<sup>a</sup> Valores dados como parámetro estimado ± intervalos de confianza al 95%. Los valores para una columna y sustancia difusora seguidos de la misma letra mayúscula no son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

Los valores de CFT, ANT y CAT de los productos pretratados se observan significativamente mayores que los presentados en las Tablas 3.6 y 3.7, lo que indica que el proceso el proceso de fritura promovió la concentración de estos componentes (Kalogeropoulos et al., 2007; Silva et al., 2020).

## IV. Conclusiones

- El modelo de DO desarrollado para evaluar el efecto de las ETM completamente acopladas considerando el encogimiento estimó de forma adecuada las difusividades y equilibrios (agua y soluto) en papaya osmodeshidratada con solución de sacarosa evitando la sobreestimación (hasta un 281 % para agua y un 75 % para soluto).
- La impregnación con SEJS es un método factible para incrementar CFT, ANT y CAT en productos vegetales con diferentes características en su composición.
- El modelo propuesto considerando la reducción de dimensiones de las muestras tratadas (papaya y piña) con SEJS permitió el análisis de la transferencia de masa de las diferentes sustancias que se difundieron (PA, GS, CFT, ANT y CAT), donde se observó una sobreestimación de las difusividades cuando no se considera el encogimiento (alrededor de un 20% para las condiciones experimentales estudiadas).
- Los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante transferidos de la SEJS en ambos productos se mantuvieron durante el proceso de fritura a pesar de las condiciones a los que fueron expuestos.

# Bibliografía

- Addai, Z. R., Abdullah, A., & Mutalib, S. A. (2013). Influence of ripening stages on antioxidant properties of papaya fruit (*Carica papaya* L.). In *AIP Conference Proceedings*: AIP Publishing LLC.
- Ade-Omowaye, B., Rastogi, N., Angersbach, A., & Knorr, D. (2002). Osmotic dehydration behavior of red paprika (*Capsicum Annuum* L.). *Journal of Food Science*, 67(5), 1790–1796.
- Adsare, S., Bellary, A., Sowbhagya, H., Baskaran, R., Prakash, M., & Rastogi, N. (2016). Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from indian gooseberry (*Emblica officinalis*). *Journal of Food Engineering*, 175, 24–32.
- Aguirre-García, M., Cortés-Zavaleta, O., Hernández-Carranza, P., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C., & Ruiz-López, I. (2023). Modeling the impregnation of roselle antioxidants into papaya cubes. *Journal of Food Engineering*, Aceptado para publicación.
- Aguirre-García, M., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C., & Ruiz-López, I. (2022). The role of coupled water and solute diffusion and product shrinkage during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 331, 111121.
- Aguirre-García, M., Hernández-Carranza, P., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E., & Ruiz-López, I. I. (2020). Mass transfer analysis of bioactive compounds in apple wedges impregnated with beetroot juice: a 3D modelling approach. *Journal of Food Engineering*, 282, 110003.
- Ahmed, I., Qazi, I. M., & Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science*

- and Emerging Technologies*, 34.
- Akdeniz, N., Sahin, S., & Sumnu, G. (2006). Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 75, 522–526.
- Al-juhaimi, F., Ghafoor, K., Özcan, M. M., Jahurul, M. H. A., Babiker, E. E., Jinap, S., Sahena, F., Sharifudin, M. S., & Zaidul, I. S. M. (2018). Effect of various food processing and handling methods on preservation of natural antioxidants in fruits and vegetables. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 3872–3880.
- Alam, M. S., Amarjit, S., & Sawhney, B. K. (2010). Response surface optimization of osmotic dehydration process for aonla slices. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), 47–54.
- Albano, C., Negro, C., Tommasi, N., Gerardi, C., Mita, G., Miceli, A., Bellis, L. D., & Blando, F. (2015). Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L) mill.] fruits from apulia (South Italy) genotypes. *Antioxidants*, 4.
- Alzamora, S. M., Salvatori, D., Tapia, M. S., López-Malo, A., Welti-Chanes, J., & Fito, P. (2005). Novel functional foods from vegetable matrices impregnated with biologically active compounds. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 205–214.
- Ammawath, W., Che Man, Y. B., Yusof, S., & Rahman, R. A. (2001). Effects of variety and stage of fruit ripeness on the physicochemical and sensory characteristics of deep-fat-fried banana chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 1166–1171.
- Andrés, A., Arguelles, A., Castelló, M. L., & Heredia, A. (2012). Mass transfer and volume changes in french fries during air frying. *Food and Bioprocess Technology*,

- 6(8), 1917–1924.
- Anokwuru, C. P., Esiaba, I., Ajibaye, O., & Adesuyi, A. O. (2011). Polyphenolic content and antioxidant activity of *Hibiscus sabdariffa* calyx. *Research Journal of Medicinal Plants*, 5, 557–666.
- Apak, R., Özyürek, M., Güclü, K., & Çapanoglu, E. (2016). Antioxidant activity/capacity measurement. 2. Hydrogen Atom Transfer (HAT)-based, mixed-mode Electron Transfer (ET/HAT), and lipid peroxidation assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64, 1028–45.
- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., & Anandharamakrishnan, C. (2015). Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, 144, 119–128.
- Arballo, J. R., Bambicha, R. R., Campanone, L. A., Agnelli, M. E., & Mascheroni, R. H. (2012). Mass transfer kinetics and regression-desirability optimisation during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 306–314.
- Asghar, N., Naqvi, S. A. R., Hussain, Z., Rasool, N., Khan, Z. A., Shahzad, S. A., Sherazi, T. A., Janjua, M. R. S. A., Nagra, S. A., Zia-Ul-Haq, M., & Jaafar, H. Z. (2016). Compositional difference in antioxidant and antibacterial activity of all parts of the *Carica papaya* using different solvents. *Chemistry Central Journal*, 10(1).
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2016). Mass transfer in osmotic dehydration of food products comparison between mathematical models. *Food Engineering Reviews*, 8, 116–133.
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2017). Mathematical modeling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. *Journal of Food Processing*

- and Preservation*, 41, e12895.
- Azarpazhooh, E. & Ramaswamy, H. S. (2011). Modeling and optimization of microwave osmotic dehydration of apple cylinders under continuous-flow spray mode processing conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), 1486–1501.
- Azuara, E., Beristain, C., & García, H. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food and Science Technology*, 29, 239–242.
- Bai, W., Wang, C., & Ren, C. (2014). Intakes of total and individual flavonoids by us adults. *Food Sciences and Nutrition*, 65, 9–20.
- Barbosa Júnior, J. L., Cordeiro Mancini, M., & Hubinger, M. D. (2013). Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange fleshed honey dew melon in corn syrup and sucrose solutions. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 2463–2473.
- Barragán-Iglesias, J., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2018a). Ripeness indexes and physicochemical changes of papaya (*Carica papaya* L. cv. maradol) during ripening on-tree. *Scientia Horticulturae*, 236, 272–278.
- Barragán-Iglesias, J., Rodríguez-Ramírez, J., Sablani, S. S., & Méndez-Lagunas, L. L. (2018b). Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. maradol) pre-treated with calcium and osmotic dehydration. *Drying Technology*, 37(7), 906–919.
- Barrera, C., Burca, C., Betoret, E., García-Hernández, J., Hernández, M., & Betoret, N. (2019). Improving antioxidant properties and probiotic effect of clementine juice inoculated with *Lactobacillus salivarius* spp. *salivarius* (CECT 4063) by trehalose addition and or sublethal homogenisation. *Food Science Technology*, 54, 2109–2122.

- Bchir, B., Bouaziz, M. A., Ettaib, R., Sebi, H., Danthine, S., Blecker, C., Besbes, S., & Attia, H. (2020). Optimization of ultrasound-assisted osmotic dehydration of pomegranate seeds (*Punica granatum* L.) using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*.
- Bellary, A. & Rastogi, N. (2014). Effect of selected pretreatments on impregnation of curcuminoids and their influence on physico-chemical properties of raw banana slices. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2803–2812.
- Bellary, A. N., Indiramma, A. R., Prakash, M., Baskaran, R., & Rastogi, N. K. (2016). Anthocyanin infused watermelon rind and its stability during storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 33, 554 – 562.
- Bellary, A. N. & Rastogi, N. K. (2012). Effect of hypotonic and hypertonic solutions on impregnation of curcuminoids in coconut slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 33–40.
- Bellary, A. N., Sowbhagya, H., & Rastogi, N. K. (2011). Osmotic dehydration assisted impregnation of curcuminoids in coconut slices. *Journal of Food Engineering*, 105(3), 453–459.
- Berbert, P. A., de Oliveira, M. T. R., & Martinazzo, A. P. (2016). Drying of pineapple slices in natura and pre-osmodehydrated in inverted sugar. *Bioscience Journal*, 32(3), 597–610.
- Betoret, E., Betoret, N., Arilla, A., Bennár, M., Barrera, C., Codoñer, P., & Fito, P. (2012). Non-invasive methodology to produce a probiotic low humid apple snack with potential effect against *Helicobacter pylori*. *Journal of Food Engineering*, 110, 289 – 293.
- Bialik, M., Wiktor, A., Latocha, P., & Gondek, E. (2018). Mass transfer in osmotic dehydration of kiwiberry: experimental and mathematical modelling studies.

- Molecules*, 23, 1236.
- Borrás-Linares, I., Fernández-Arroyo, S., Arráez-Roman, D., Palmeros-Suárez, P. A., Val-Díaz, R., Andrade-González, I. D., Fernández-Gutiérrez, A., Gómez-Leyva, J. F., & Segura-Carretero, A. (2015). Characterization of phenolic compounds, anthocyanidin, antioxidant and antimicrobial activity of 25 varieties of Mexican Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Industrial Crops and Products*, 69.
- Carocho, M., Morales, P., & Ferreira, I. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food application, legislation and role as preservatives. *Trends Food Science and Technology*, 71, 107–120.
- Castelló, M., Fito, P., & Chiralt, A. (2010). Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. *Journal of Food Engineering*, 97, 64–71.
- Castillo-Santos, K., Ruiz-López, I., Rodríguez-Jimenes, G., Carrillo-Ahumada, J., & García-Alvarado, M. (2017). Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, 192, 36–44.
- Cerretani, L. & Bendi, A. (2010). Chapter 67. Rapid assays to evaluate the antioxidant capacity of phenols in virgin olive oil. In *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention*. Academic Press.
- Chan-León, A., Estrella-Maldonado, H., Dubé, P., Fuentes-Ortíz, G., Moo-Huchin, V. M., Can-Cauich, C. A., Sauri-Duch, E., Desjardins, Y., & Santamaría, J. M. (2021). Determination of total phenolic contents and antioxidant activities of fruits from wild and creole *Carica papaya* genotypes in comparison to commercial papaya cultivars. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(6), 5669–5682.

- Chandra, A., Kumar, S., Tarafdar, A., & Nema, P. K. (2020). Ultrasonic and osmotic pretreatments followed by convective and vacuum drying of papaya slices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 2264–2272.
- Chenlo, F., Moreira, R., Fernández-Herrero, C., & Vázquez, G. (2006). Mass transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions. *Journal of Food Engineering*, 73, 164 – 173.
- Cheyrier, V. (2012). Phenolic compounds: from plants to foods. *Phytochemistry Reviews*, 11, 153–177.
- Choi, Y. & Okos, M. (1985). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications*, 1, 93–101.
- Chumsri, P., Sirichote, A., & Itharat, A. (2008). Studies on the optimum conditions for the extraction and concentration of roselle (*Hibiscus sabdariffa* linn.) extract. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 30, 133–139.
- Cid-Ortega, S. & Guerrero-Beltran, J. (2012). Propiedades funcionales de la jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Temas selectos de la Ingeniería de Alimentos*, 2, 47–63.
- Cissé, M., Vaillant, F., Pallet, D., & Dornier, M. (2011). Selecting ultrafiltration and nanofiltration membranes to concentrate anthocyanins from roselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Food Research International*, 44, 2607–2617.
- Cömert, E. & Gökmen, V. (2018). Evolution of food antioxidants as a core topic of food science for century. *Food Research International*, 105, 76–93.
- Colle, I. J. P., Lemmens, L., Tolesa, G. N., Buggenhout, S. V., Vleeschouwer, K. D., Loey, A. M. V., & Hendrickx, M. E. (2010). Lycopene degradation and isomerization kinetics during thermal processing of an olive oil/tomato emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(24), 12784–12789.
- Correa, J., Rasia, M., Mulet, A., & Cárcel, J. (2017). Influence of ultrasound appli-

- cation on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, (pp. 284–291).
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Clarendon Press.
- da Silva Júnior, A. F., da Silva, W. P., de Farias Aires, J. E., Aires, K. L. C. A. F., & de Castro, D. S. (2016). Osmotic dehydration kinetics of banana slices considering variable diffusivities and shrinkage. *International Journal of Food Properties*, 20(6), 1313–1325.
- de Almeida Aires, K. L. C., da Silva, W. P., de Farias Aires, J. E., da Silva Júnior, A. F., & da Silva Silva, C. M. D. P. (2018). Apple osmotic dehydration described by three-dimensional numerical solution of the diffusion equation. *Drying Technology*, 36(16), 1970–1981.
- de Farias Aires, J. E., da Silva, W. P., de Almeida Farias Aires, K. L. C., da Silva Júnior, A. F., & da Silva e Silva, C. M. D. P. (2017). Description of osmotic dehydration of apple using two-dimensional diffusion models considering shrinkage and variations in process parameters. *Drying Technology*, 35, 815–826.
- de Farias Aires, J. E., da Silva, W. P., de Almeida Farias Aires, K. L. C., da Silva Júnior, A. F., de Castro, D. S., & da Silva Silva, C. M. D. P. (2016). Guava osmotic dehydration: Description by two-dimensional diffusion models considering shrinkage and variations in process parameters. *International Journal of Food Engineering*, 12(6), 527–536.
- de la Rosa, L., Moreno-Escamilla, J., Rodrigo-García, J., & Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic compounds. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, (pp. 253–271).
- de Lima, M. M., Tribuzi, G., de Souza, J. A. R., de Souza, I. G., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2016). Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified

- pineapple snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 72, 501–509.
- de Medeiros, R. A. B., da Silva Júnior, E. V., da Silva, J. H. F., da Cunha Ferreira Neto, O., Brandão, S. C. R., Barros, Z. M. P., da Rocha, O. R. S., & Azoubel, P. M. (2019). Effect of different grape residues polyphenols impregnation techniques in mango. *Journal of Food Engineering*, 262, 1–8.
- de Vasconcellos Santos Batista, D., Reis, R. C., Almeida, J. M., Rezende, B., Bragança, C. A. D., & da Silva, F. (2019). Edible coatings in post-harvest papaya: impact on physical–chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 274–281.
- Delgado, T., Paim, B., Pereira, J. A., Casal, S., & Ramalhosa, E. (2018). Optimization of osmotic dehydration of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) slices using response surface methodology. *International Journal of Food Studies*, (pp. 52–68).
- Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., Gao, Z.-J., & Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes - A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 1408–1432.
- Derossi, A., Severini, C., Del Mastro, A., & De Pilli, T. (2015). Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach. *LWT - Food Science and Technology*, 60(2), 641–648.
- Dima, I. G., Aprodu, I., Enachi, E., Horincar, G., Bolea, C. A., Bahrim, G. E., Râpeanu, G., & Stănciuc, N. (2019). Investigations on thermostability of carotenoids from tomato peels in oils using a kinetic approach. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1).
- Dinçer, C. (2021). Modeling of hibiscus anthocyanins transport to apple tissue du-

- ring ultrasound-assisted vacuum impregnation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6).
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L., & Murr, F. E. X. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267–274.
- Eren, İ. & Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 344–352.
- Estévez-Sánchez, K., Ruiz-Espinosa, H., Corona-Jiménez, E., López-Méndez, E., Cortés-Zavaleta, O., Ochoa-Velasco, C., & Ruiz-López, I. (2021). Water diffusivity estimation in air-dried complex-shaped foods by the method of slopes: Application to oblate spheroid geometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105949.
- Etemadi, A., Alizadeh, R., & Sirousazar, M. (2020). The influence of natural basil seed gum coats on the kinetics of osmotic dehydration of apple rings. *Food and Bioprocess Technology*, 13(9), 1505–1515.
- Fabi, J. P., Seymour, G. B., Graham, N. S., Broadley, M. R., May, S., Lajolo, F. M., Cordenunsi, B., & do Nascimento, J. R. O. (2012). Analysis of ripening-related gene expression in papaya using an arabidopsis-based microarray. *BMC Plant Biology*, 12.
- Fabre, R., Dalzotto, G., Perlo, F., Bonato, P., Teira, G., & Tisocco, O. (2018). Cooking method effect on warner-bratzler shear force of different beef muscles. *Meat Science*, 138, 10–14.
- Fernández, P., Mascheroni, R., & Ramallo, L. (2019). Ascorbic acid and calcium uptake in pineapple tissue through different sucrose concentrations of impregnation

- solution. *Journal of Food Engineering*, 261, 150–157.
- Ferreira, E. A., Siqueria, H., Vilas, E., Hermes, V., & Oliveira, A. D. (2016). Bioactive compounds and antioxidant activity of pineapple fruit of different cultivars. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38, e-146.
- Gallegos-Marin, I., Méndez-Lagunas, L., Rodríguez-Ramírez, J., & Martínez-Sánchez, C. (2016). Structural properties changes during osmotic drying of plantain (*Musa paradisiaca* AAB) and its role on mass transfer. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.
- Ganjloo, A., Rahman, R. A., Bakar, J., Osman, A., & Bimakr, M. (2012). Kinetics modeling of mass transfer using Peleg equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): Effect of process parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 5.
- Gao, X., Ohlander, M., Jeppsson, N., Björk, L., & Trajkovski, V. (2000). Changes in antioxidant effects and their relationship to phytonutrients in fruits of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) during maturation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(5), 1485–1490.
- García-Márquez, E., Fernández-Segovia, I., & Fuentes-López, A. (2015). *Determinación de polifenoles totales por Método de Folin-Ciocalteu*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gayosso-García, L., Yahia, E. M., Martínez-Téllez, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2010). Effect of maturity stage of papaya maradol on physiological and biochemical parameters. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5, 199–208.
- Gayosso-García, L. E., Vela-Gutiérrez, G., & García, H. S. (2018). Papaya (*Carica papaya*). *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health*, 2.

- Ghaitaranpour, A., Koocheki, A., Mohebbi, M., & Ngadi, M. O. (2018). Effect of deep fat and hot air frying on doughnuts physical properties and kinetic of crust formation. *Journal of Cereal Science*, 83, 25–31.
- Gharsallaoui, A., Rogé, B., Génotelle, J., & Mathlouthi, M. (2008). Relationships between hydration number, water activity and density of aqueous sugar solutions. *Food Chemistry*, 106(4), 1443–1453.
- Giannakourou, M., Strati, I. F., Kriebardis, A. G., Mantanika, V., Poulis, S., Zoumpoulakis, P., & Sinanoglou, V. J. (2019). Shelf life extension and quality improvement of cucumber slices impregnated in infusions of edible herbs. *Analytical Letters*, 52, 2677–2691.
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). Expert consensus document: the international scientific association for probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews: Gastroenterology and Hepatology*, 14, 491–502.
- Giusti, M. & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 00(1).
- Gomes, W. F., França, F. R. M., Denadai, M., Andrade, J., Oliveira, E. M. S. D., de Brito, E. S., Rodrigues, S., & Narain, N. (2018). Effect of freeze- and spray-drying on physico-chemical characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 20952102.
- González-Pérez, J. E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velásco, C. E., & Ruiz-López, I. I. (2019). Analysis of mass transfer and

- morphometric characteristics of white mushroom (*Agaricus bisporus*) pilei during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 240, 120–132.
- Grajales-Lagunes, A., Cabrera-Ruiz, L., Gutierrez-Miceli, F., Ruiz-Cabrera, M., Dendooven, L., & Abud-Archila, M. (2019). Anthocyanins from blackberry (*Rubus fruticosus* L.) impregnated in yam bean (*Pachyrhizus erosus* (L.) urb.) by osmotic dehydration. *Food Science and Technology*, 39(4), 922–929.
- Grajeda-Iglesias, C., Figueroa-Espinoza, M., Barouh, N., Barea, B., Fernandes, A., de Freitas, V., & Salas, E. (2016). Isolation and characterization of anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* flowers. *Journal of Natural Products*, 79, 1709–1718.
- Granato, D., Barba, F., Kovacevic, D., Lorenzo, J., Cruz, A., & Putnik, P. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11, 93–118.
- Grosso, G., Stepaniak, U., Topor-Madry, R., Szafraniec, K., & Pajak, A. (2014). Estimated dietary intake and major food sources of polyphenols in the polish arm of the hapiee study. *Nutrition*, 30, 1398–1403.
- Halliwell, B. & Gutteridge, J. (2015). Antioxidant defenses synthesized in vivo. In *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford Univ, Press.
- Hawkes, J. & Flink, J. (1978). Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Process and Preservation*, 2, 265–284.
- Hayes, C. F. (1984). Thermal diffusivity of papaya fruit (*Carica papaya* L., var. solo). *Journal of Food Science*, 49(4), 1219–1219.
- Helkar, P., Sahoo, A., & Patil, N. (2016). Review: Food industry by-products uses as a functional food ingredients. *International Journal of Waste Resource*, 6, 248.
- Herbig, A.-L. & Renard, C. M. (2017). Factors that impact the stability of vitamin C at intermediate temperatures in a food matrix. *Food Chemistry*, 220, 444–451.

- Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C. E., Pacheco-Angulo, H., Carmona-García, R., Ruiz-Espinosa, H., & Ruiz-López, I. I. (2013). Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions. *Food and Bioproducts Processing*, 91, 216–224.
- Hernández-Carranza, P., Heredia-Soberanes, K., Ruiz-López, I. I., & Ochoa-Velasco, C. E. (2022). Effect of impregnation-osmodehydration with *Hibiscus sabdariffa* extracts on the bioactive compounds and sensory acceptance of apple wedges: Fresh, convective dried, and stored. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11).
- Hernández-Rodríguez, P., Pabón, L., & Rodríguez, H. (2019). Chapter 14 - flavonoids: potential therapeutic agents by their antioxidant capacity. In *Bioactive Compounds*. Woodhead Publishing.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., & Sanders, M. E. (2014). The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews. Gastroenterology and Hepatology*, 11, 506–514.
- Hogervorst, J., Atanackovic, M., Bursac, M., & Miljic, U. (2017). Chapter 7. polyphenolics. In *Nutraceutical and Functional Food components: Effects of Innovative Processing Techniques*. Academic Press.
- Hossain, M. & Rahman, S. (2011). Total phenolics, flavonoids and antioxidant activity of tropical fruit pineapple. *Food Research International*, 44, 672–676.
- Hough, G., Chirife, J., & Marini, C. (1993). A simple model for osmotic dehydration of apples. *LWT - Food Science and Technology*, 26(2), 151–156.
- Jain, S. K., Verma, R. C., Murdia, L. K., Jain, H. K., & Sharma, G. P. (2010). Optimi-

- zation of process parameters for osmotic dehydration of papaya cubes. *Journal of Food Science and Technology*, 48(2), 211–217.
- Jiang, N., Doseff, A., & Grotewold, E. (2016). Flavones: from biosynthesis to health benefits. *Plants*, 5, 27.
- Jiménez, N., Bassama, J., Soto, M., Dornier, M., Pérez, A. M., Vaillant, F., & Bohuon, P. (2020). Coupling osmotic dehydration with heat treatment for green papaya impregnated with blackberry juice solution. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(6), 2551–2561.
- Joshy, C. G., Ratheesh, G., Ninan, G., Kumar, K. A., & Ravishankar, C. N. (2020). Optimizing air-frying process conditions for the development of healthy fish snack using response surface methodology under correlated observations. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2651–2658.
- Jung, E., Kim, Y., & Joo, N. (2013). Physicochemical properties and antimicrobial activity of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93.
- Kalogeropoulos, N., Mylona, A., Chiou, A., Ioannou, M. S., & Andrikopoulos, N. K. (2007). Retention and distribution of natural antioxidants ( $\alpha$ -tocopherol, polyphenols and terpenic acids) after shallow frying of vegetables in virgin olive oil. *LWT - Food Science and Technology*, 40(6), 1008–1017.
- Kamboh, R., Bera, M. B., & Nanda, V. (2017). Mass transfer kinetic study of honey based apple preserve through osmotic dehydration. *Asian Journal of Chemistry*, 29, 166–170.
- Kaur, K. & Singh, A. K. (2013). Mathematical modelling of mass transfer for osmotic dehydration of beetroot (*Beta vulgaris* L). *International Journal of Agricultural Science and Research*, 3, 1–10.

- Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C., & Bongers, P. (2009). A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International*, 42(8), 1122–1130.
- Khoo, H., Azlan, A., Tang, S., & Lim, S. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food and Nutrition Research*, 61, 1361779.
- Khoyi, M. R. & Hesar, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 1355–1360.
- Kongsuwan, A., Suthiluk, P., Theppakorn, T., Srilaong, V., & Setha, S. (2009). Bioactive compounds and antioxidant capacities of phulae and nanglae pineapple. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 38, S44–S50.
- Kurozawa, L. E., Fernandes Barbin, D., & Hubinger, M. D. (2017). Chapter 14 - implications of non-equilibrium states and glass transitions in frozen and dried fish and meat products. *Woodhead Publishing Series in Food Science*, (pp. 325–348).
- Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D., & Park, K. J. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 43–50.
- Le, D. & Konsue, N. (2021). Mass transfer behavior during osmotic dehydration and vacuum impregnation of "Phulae" pineapple and the effects on dried fruit quality. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 9(1), 308–319.
- Lee, E. J., Nomura, N., Patil, B. S., & Yoo, K. S. (2014). Measurement of total phenolic content in wine using an automatic Folin-Ciocalteu assay method. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(11), 2364–2372.

- Lobo, M. G. & Pastor, C. R. (2012). Papaya. *Tropical and Subtropical Fruits: Post-harvest Physiology, Processing and Packaging*, (pp. 299–319).
- Lu, X.-H., Sun, D.-Q., Wu, Q.-S., Liu, S.-H., & Sun, G.-M. (2014). Physico-chemical properties, antioxidant activity and mineral contents of pineapple genotypes grown in china. *Molecules*, 19(6), 8518–8532.
- Luna-Guevara, M. L., Jimenez-Gonzalez, O., Luna-Guevara, J. J., Hernandez-Carranza, P., & Ochoa-Velasco, C. E. (2014). Quality parameters and bioactive compounds of red tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) cv roma VF at different postharvest conditions. *Journal of Food Research*, 3(5), 8.
- Maeda-Yamamoto, M. (2017). Development of functional agricultural products and use of new health claim system in Japan. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 324–332.
- Maleki, M., Shahidi, F., Varidi, M. J., & Azarpazhooh, E. (2019). Hot air drying kinetics of novel functional carrot snack: Impregnated using polyphenolic rich osmotic solution with ultrasound pretreatment. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2).
- Martirosyan, D. & Miller, E. (2018). Bioactive compounds: the key to functional foods. *Bioactive Compounds in Health and Disease*, 8, 36–39.
- Martirosyan, D. & Pisarski, K. (2017). Bioactive compounds: their role in functional food and human health, classifications, and definitions. In *Functional Foods and Cancer: Bioactive Compounds and Cancer*. Food Science Publisher.
- Martirosyan, D. & Singh, J. (2015). A new definition of functional food by FFC: What makes a new definition unique? *Functional Food in Health and Disease*, 5, 209–223.
- Mattioli, R., Francioso, A., Mosca, L., & Silva, P. (2020). Anthocyanins: A comprehen-

- sive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules*, 25(17), 3809.
- Mayor, L., Moreira, R., & Sereno, A. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 29–37.
- Mohanty, D., Misra, S., Mohapatra, S., & Sahu, P. (2018). Prebiotics and synbiotics: recent concepts in nutrition. *Food Bioscience*, 26, 152–160.
- Mokhtar, W. M. F. W., Ghawi, S. K., & Niranjana, K. (2018). Dehydration of potato slices following brief dipping in osmotic solutions: Effect of conditions and understanding the mechanism of water loss. *Drying Technology*, 37(7), 885–895.
- Mokhtarian, M., Majid, M. H., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Garmakhany, A. D., & Rashidzadeh, S. (2014). Optimisation of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, 6, 201–214.
- Morandi, M., Silva, V., & Maróstica, M. (2019). Phenolic compounds: structure, classification, and antioxidant power. In *Bioactive Compounds*. Woodhead Publishing.
- Moreira Azoubel, P. & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61, 291–295.
- Moreno, Y. S., Ruiz, J. S., & Trujillo, E. E. (2010). *Aprovechamiento y distribución de maíz azul en el Estado de México*. Technical report, Universidad de Guanajuato.
- Moyano, P. C. & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 285–291.
- Mubarak, A., Croft, K. D., Bondonno, C. P., & Din, N. S. (2019). Comparison of liberica and arabica coffee: chlorogenic acid, caffeine, total phenolic and dpph radical scavenging activity. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 7, 130–

136.

- Mundada, M., Hathan, B. S., & Maske, S. (2011). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of pomegranate arils. *Journal of Food Science*, 76.
- Nambiar, S. S., Basu, A., Shetty, N. P., Rastogi, N. K., & Prapulla, S. G. (2016). Infusion of fructooligosaccharide in indian gooseberry (*Emblica officinalis*) fruit using osmotic treatment and its effect on the antioxidant activity of the fruit. *Journal of Food Engineering*, 190, 139 – 146.
- Ochoa-Martinez, C. I., Ramaswamy, H. S., & Ayala-Aponte, A. A. (2007). A comparison of some mathematical models used for the prediction of mass transfer kinetics in osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology*, 25, 1613–1620.
- Ochoa-Martínez, C. I. & Ayala-Aponte, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y tecnología alimentaria*, 4, 330–342.
- Ochoa-Velasco, C. E. & Ruiz-López, I. I. (2019). Mass transfer modeling of the antioxidant extraction of roselle flower (*Hibiscus sabdariffa*). *Journal of Food Science and Technology*, 56.
- Oroian, M. & Escriche, I. (2015). Antioxidants: characterization, natural sources, extraction and analysis-review. *Food Research International*, 74, 10–36.
- Ortiz-García-Carrasco, B., Yañez-Mota, E., Pacheco-Aguirre, F., Ruiz-Espinosa, H., García-Alvarado, M., Cortés-Zavaleta, O., & Ruiz-López, I. (2015). Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 144, 138–147.
- Othman, O. (2009). Physical and chemical composition of storage-ripened papaya (*Carica papaya* L.) fruits of eastern tanzania. *Tanzania Journal of Science*, 25,

47–55.

- Ozcan, T., Akpinar-Bayazit, A., Yilmaz-Ersan, L., & Delikanli, B. (2014). Phenolics in human health. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 5, 393–396.
- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M., & Ruiz-López, I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: Equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 88–99.
- Padrón-Mederos, M., Rodríguez-Galdón, B., Díaz-Romero, C., Lobo-Rodrigo, M. G., & Rodríguez-Rodríguez, E. M. (2020). Quality evaluation of minimally fresh-cut processed pineapples. *LWT*, 129, 109607.
- Panche, A., Diwan, A., & Chandra, S. (2016). Flavonoids: an overview. *Journal of Nutritional Science*, 5, e47.
- Pardo-Botello, R., Chamizo-Calero, F., Monago-Maraña, O., Rodríguez-Corchado, R., de la Torre-Carreras, R., & Galeano-Díaz, T. (2021). Evaluation of hydrophilic and lipophilic antioxidant capacity in spanish tomato paste: Usefulness of front-face total fluorescence signal combined with parafac. *Food Analytical Methods*, 15(4), 981–992.
- Parven, A., Sarker, M. R., Megharaj, M., & Mefaul, I. M. (2020). Prolonging the shelf life of papaya (*Carica papaya* L.) using aloe vera gel at ambient temperature. *Scientia Horticulturae*, 265, 109228.
- Patil, B., Gupta, S., & Wankhade, V. (2014). Response surface methodology of osmotic dehydration for sapota slices. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 4, 249–260.
- Patil, P. S., Deshannavar, U. B., Ramasamy, M., & Emani, S. (2021). Production, op-

- timization, and characterization of sugarcane (*Saccharum officinarum*) -papaya (*Carica papaya*) wine using *Saccharomyces cerevisiae*. *Environmental Technology Innovation*, 21, 101290.
- Paz-Gamboa, E., Ramírez-Figueroa, E., Vivar-Vera, M. A., Bravo-Delgado, H. R., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., & Ruiz-López, I. I. (2015). Study of oil uptake during deep-fat frying of taro (*Colocasia esculenta*) chips. *CyTA - Journal of Food*, 13, 506–511.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216–1219.
- Permadi, E. & Nugroho, L. (2019). The effect of orange, pineapple, and guava waste extract on the phenolic content in green betel (*Piper betle* L.). In *1st International Conference on Bioinformatics, Biotechnology, and Biomedical Engineering*. AIP Publishing.
- Pisoschi, A. M., Pop, A., Iordache, F., Stanca, L., Predoi, G., & Serban, A. I. (2021). Oxidative stress mitigation by antioxidants - An overview on their chemistry and influences on health status. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 209, 112891.
- Pissarra, J., Assis, F., Morais, R., & Morais, A. (2019). Osmotic dehydration of cut apple: Mass transfer kinetics and microstructural changes. *Acta Alimentaria*, 48, 86–95.
- Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4290–4302.
- Prosapio, V. & Norton, I. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance. *LWT*, 80, 401–408.

- Ramallo, L. A., Hubinger, M. D., & Mascheroni, R. H. (2013). Effect of pulsed vacuum treatment on mass transfer and mechanical properties during osmotic dehydration of pineapple slices. *International Journal of Food Engineering*, 9(4), 403–412.
- Ramallo, L. A. & Mascheroni, R. H. (2012). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 275 – 283.
- Rojas, M. L., Alvim, I. D., & Augusto, P. E. D. (2019). Incorporation of microencapsulated hydrophilic and lipophilic nutrients into foods by using ultrasound as a pre-treatment for drying: A prospective study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 153 – 161.
- Ruiz-López, I. I., Ruiz-Espinosa, H., Pacheco-Aguirre, F. M., & García-Alvarado, M. A. (2013). Drying of food products shaped as longitudinal sections of solid and annular cylinders: Modeling and simulation. *Drying Technology*, 31(10), 1148–1159.
- Ruiz-López, I. I., H. Ruiz-Espinosa, Herman-Lara, E., & Zárata-Castillo, G. (2011). Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering*, 104, 218–226.
- Safari, A., Salamat, R., & Baik, O. (2018). A review on heat and mass transfer coefficients during deep-fat frying: Determination methods and influencing factors. *Journal of Food Engineering*, 230, 114–123.
- Sahin, S. & Sumnu, S. (2009). *Advances in Deep-Fat Frying of Foods*. CRC Press.
- Salazar-López, E. I., Jiménez, M., Salazar, R., & Azuara, E. (2015). Incorporation of microcapsules in pineapple intercellular tissue using osmotic dehydration and microencapsulation method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1699–1706.
- Santacruz-Vázquez, C. & Santacruz-Vázquez, V. (2015). The spatial distribution of

- beta-carotene impregnated in apple slices determined using image and fractal analysis. *Food and Science Technology*, 52.
- Santos, C. S. P., Cunha, S. C., & Casal, S. (2017). Deep or air frying? a comparative study with different vegetable oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(6), 1600375.
- Sarkar, T., Salauddin, M., Hazra, S. K., & Chakraborty, R. (2020). The impact of raw and differently dried pineapple (*Ananas comosus*) fortification on the vitamins, organic acid and carotene profile of dairy rasgulla (sweetened cheese ball). *Heliyon*, 6(10), e05233.
- Shamsudin, R., Daud, W. R. W., Takriff, M. S., & Hassan, O. (2007). Physicochemical properties of the josapine variety of pineapple fruit. *International Journal of Food Engineering*, 3(5).
- Shukla, A., Shukla, R., Das, C., & Goud, V. V. (2019). Gingerols infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango. *Food Chemistry*, 300, 125195.
- Silva, J. S., Ortiz, D. W., García, L. G. C., Asquieri, E. R., Becker, F. S., & Damiani, C. (2020). Effect of drying on nutritional composition, antioxidant capacity and bioactive compounds of fruits co-products. *Food Science and Technology*, 40(4), 810–816.
- Silva, K. S., Fernandes, M. A., & Mauro, M. A. (2013). Osmotic dehydration of pineapple with impregnation of sucrose, calcium, and ascorbic acid. *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 385–397.
- Singh, B., Kumar, A., & Gupta, A. K. (2007). Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 471 – 480.

- Singh, B., Singh, J., Kaur, A., & Singh, N. (2017). Phenolic composition and antioxidant potential of green legume seed: a review. *Food Research International*, 101, 1–16.
- Soares de Mendonça, K., Gomes Corrêa, J. L., Junqueira, J. R., Cardoso de Angelis Pereira, M., & Barbosa Vilela, M. (2015). Optimization of osmotic dehydration of yacon slices. *Drying Technology*, 34(4), 386–394.
- Song, G., Li, L., Wang, H., Zhang, M., Yu, X., Wang, J., Xue, J., & Shen, Q. (2020). Real-time assessing the lipid oxidation of prawn (*Litopenaeus vannamei*) during air-frying by iKnife coupling rapid evaporative ionization mass spectrometry. *Food Control*, 111, 107066.
- Soto, M., Pérez, A. M., Servent, A., Vaillant, F., & Achir, N. (2021). Monitoring and modelling of physicochemical properties of papaya chips during vacuum frying to control their sensory attributes and nutritional value. *Journal of Food Engineering*, 299, 110514.
- Souraki, B., Ghavami, M., & Tondro, H. (2014). Correction of moisture and sucrose diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. *Food and Bioproducts Processing*, 92, 1–8.
- Souraki, B. A., Ghaffari, A., & Bayat, Y. (2012). Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 64–71.
- Su, Y., Zhang, M., Bhandari, B., & Zhang, W. (2018). Enhancement of water removing and the quality of fried purple-fleshed sweet potato. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 368–379.
- Sukkhaeng, S., Promdang, S., & Doung-ngern, U. (2018). Fruit characters and physicochemical properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Thailand a screening

- of 13 new genotypes. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 11, 47–53.
- Teruel, M. R., Gordon, M., Linares, M. B., Garrido, M. D., Ahromrit, A., & Niranjana, K. (2015). A comparative study of the characteristics of french fries produced by deep fat frying and air frying. *Journal of Food Science*, 80(2), E349–E358.
- Tian, J., Chen, S., Shi, J., Chen, J., Liu, D., Cai, Y., Ogawa, Y., & Ye, X. (2017). Microstructure and digestibility of potato strips produced by conventional frying and air-frying: An *in vitro* study. *Food Structure*, 14, 30–35.
- Torrington, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R., & Bartels, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 49(2-3), 185–191.
- Udomkun, P., Argyropoulos, D., Nagle, M., Mahayothee, B., & Müller, J. (2015). Sorption behaviour of papayas as affected by compositional and structural alterations from osmotic pretreatment and drying. *Journal of Food Engineering*, 157, 14–23.
- Udomkun, P. & Innawong, B. (2018). Effect of pre-treatment processes on physico-chemical aspects of vacuum-fried banana chips. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42, e13687.
- Uribe, E., Delgadillo, A., Giovagnoli-Vicuña, C., Quispe-Fuentes, I., & Zura-Bravo, L. (2015). Extraction techniques for bioactive compounds and antioxidant capacity determination of chilean papaya (*Vasconcellea pubescens*) fruit. *Journal of Chemistry*, 2015, 1–8.
- Vasconcelos, J. I. L. A., Andrade, S. A. C., Maciel, M. I. S., Guerra, N. B., & Vasconcelos, M. A. S. (2012). Osmotic dehydration of the Indian fig (*Opuntia ficus indica*) with binary and ternary solutions. *International Journal of Food Science*

- Éamp Technology*, 47(11), 2359–2365.
- Vatankhah, H. & Ramaswamy, H. S. (2019). High pressure impregnation (HPI) of apple cubes: Effect of pressure variables and carrier medium. *Food Research International*, 116, 320–328.
- Wang, H., Liu, C., Xue, Y., & Li, D. (2020). Correlation of mechanical properties of peach slices with cell wall polysaccharides and cell morphology during hot air predrying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44, e14319.
- Wen, L., Zhao, Y., Jiang, Y., LYu, Zeng, X., Yang, J., Tian, M., Liu, H., & Yang, B. (2017). Identification of a flavonoid C-glycoside as potent antioxidant. *Free Radical Biology and Medicine*, 110, 92 – 101.
- Yadav, A. K. & Singh, S. V. (2012). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1654–1673.
- Yang, L., Gou, Y., Zhao, T., Zhao, J., Li, F., Zhang, B., & Wu, X. (2012). Antioxidant capacity of extracts from calyx fruits of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 11(17), 4063–4068.
- Yilmaz, F. M. & Bilek, S. E. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 509 – 516.
- Zaghi, A. N., Barbalho, S. M., Guiguer, E. L., & Otoboni, A. M. (2019). Frying process: From conventional to air frying technology. *Food Reviews International*, 35(8), 763–777.
- Zecchi, B. & Gerla, P. (2020). Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 274, 109821.
- Zhang, X. & Liu, Y. (2021). Concurrent removal of Cu(II), Co(II) and Ni(II) from

wastewater by nanostructured layered sodium vanadosilicate: Competitive adsorption kinetics and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105945.

Zhen, J., Villani, T. S., Guo, Y., Qi, Y., Chin, K., Pan, M. H., Chi-Tang, H., Simon, J. E., & Wu, Q. (2016). Phytochemistry, antioxidant capacity, total phenolic content and anti-inflammatory activity of *Hibiscus Sabdariffa* leaves. *Food Chemistry*, 190, 673–680.