



**Universidad Autónoma de Sinaloa**

**Facultad de Ciencias Químico Biológicas**

**Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos**

Estudio de propiedades fisicoquímicas,  
compuestos bioactivos y atributos de calidad en  
botanas de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)  
horneadas

## **TESIS**

Que presenta

**M.C. OLIVIA CLARISSA CARO HERNÁNDEZ**

Para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIA**

**Y**

**TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Directora

**DRA. IRMA LETICIA CAMACHO HERNÁNDEZ**



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## **UAS-Dirección General de Bibliotecas**

### **Repositorio Institucional Buelna**

#### **Restricciones de uso**

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Caracterización Química y Funcional de Alimentos y en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas del Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección de la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y la asesoría de la Dra. Noelia Jacobo Valenzuela y de los Drs. Ernesto Aguilar Palazuelos, Roberto Gutiérrez Dorado y Carlos Alberto Gómez Aldapa. La M.C. Olivia Clarissa Caro Hernández recibió beca por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT).

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por permitirme culminar una meta más en mi vida.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, a la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas** y al **Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos** por brindarme la oportunidad de seguir avanzando en mi desarrollo profesional.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos** por el apoyo económico brindado durante cuatro años.

Al programa **PROFAPI (PRO\_A7\_029)** de la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo financiero otorgado para la realización de parte de este proyecto.

A **mi mamá, Olivia Hernández Mondaca**, por su amor y apoyo incondicional, por siempre tener palabras de aliento y superación, por ayudarme a sobrellevar cada reto del camino y no dejarme caer, por estar siempre para mí cuando lo necesito, en mis largas horas de trabajo en casa, por aguantar todas mis etapas de estos cuatro años y medio, desde el inicio de mi sueño de estudiar el posgrado, no existen palabras suficientes para agradecerle todo lo que haces por mí, ser mi mamá, amiga, consejera y leal compañera.

A **mi papá, José de Jesús Caro Corrales**, por su apoyo, comprensión y motivación, por creer siempre en mí y estar siempre para mí.

A mis hermanos, **José y Paty**, primeramente, por su amor y respaldo, por permitirme tener largas pláticas con ustedes tanto de lo académico como lo personal, por entender mis largas horas de trabajo, por motivarme y por ser parte de mi sostén. A **José**, gracias por siempre ayudarme con mis “perruchas” y mi

estrés, y a **Paty**, por nunca abandonarme, siempre escuchar y ser mi compañera de desestrés y de cuarto por siempre.

A mi **Directora de Tesis**, la **Dra. Irma Leticia Camacho Hernández**, gracias primeramente por aceptarme en su equipo de trabajo, le agradezco profundamente su confianza y su excelente disposición para brindarme su apoyo en todo momento. Gracias por permitirme recurrir a sus conocimientos y experiencia para aclarar cualquier duda que surgiera o explicarme algo que no entendía, por el tiempo que dedicó a mis asesorías, incluso extra-clase y en sus días de descanso, y por los momentos de relajación que compartimos, pláticas, risas, momentos de estrés, desahogos y vivencias. Gracias por sus palabras de motivación y por enseñarme y demostrarme que se puede con todo y contra todo, usted me dijo desde el principio que esto no sería fácil pero que juntas íbamos a poder y he aquí los resultados. Me siento muy afortunada de haber sido su estudiante una vez más, ahora en el doctorado y le agradezco, además, su amistad y apoyo incondicional, espero poder seguir aprendiendo de usted.

A los miembros del comité de tesis de doctorado: **Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos**, **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado**, **Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa** y **Dra. Noelia Jacobo Valenzuela**, gracias por su asesoramiento, orientación, comentarios y correcciones, que siempre fueron muy acertados y ayudaron al mejoramiento de este trabajo de tesis. Por siempre tener la disposición de solucionar mis dudas aun en la distancia o de manera virtual, gracias por siempre darse el tiempo para mí.

Al **Dr. José de Jesús Caro Corrales**, gracias por su respaldo incondicional, por brindarme todos sus conocimientos y por ayudarme a crecer y aprender enormemente en estos años, tanto personal como académicamente. Gracias por darme la confianza de saber que cualquier problema que se me presente usted va a hacer lo posible por ayudarme a resolverlo y no solo eso, me va a enseñar a cómo resolverlo y ser mejor para el futuro, siempre me ha dado las herramientas para poder aprender a solucionar los problemas de todo tipo.

A los miembros del equipo de ingeniería, **Dr. César Carrazco, Dra. Rosalina Iribe y Dra. Yessica Vázquez** gracias por ayudarme a pesar de no ser miembros oficiales de mi comité, yo sé que eso nunca fue un impedimento para sus revisiones de cada etapa de este trabajo, los ensayos, avances, congresos y artículo, gracias por compartir sus conocimientos conmigo y enseñarme a mejorar académicamente. Agradezco también por las pláticas y la convivencia.

A mis amigos **Greysel, Miriam, Melissa, Felicitas, Edo, Benjamín y Rogelio**, por las interminables risas, las largas pláticas, los desayunos, los momentos de desestrés, las actividades fuera del laboratorio y por hacer llevaderas las largas horas en el laboratorio, por brindarme sus conocimientos y siempre ayudarme y estar dispuestos a apoyar en el desarrollo de todas las técnicas experimentales.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	ix
I RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	4
II INTRODUCCIÓN .....	7
III REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	10
A CAMOTE .....	10
1 Generalidades.....	10
a Taxonomía.....	14
b Características botánicas .....	14
2 Contenido nutrimental .....	18
3 Importancia .....	18
a Importancia económica.....	18
1) Producción mundial .....	18
2) Producción nacional.....	21
4 Procesamiento del camote.....	21
a Productos derivados del camote .....	21
b Botanas de camote.....	22
B HORNEADO.....	24
1 Generalidades.....	24
C TRANSFERENCIA DE MASA.....	25
1 Generalidades.....	25
2 Difusión molecular en sólidos.....	25
a Difusión en sólidos porosos en los que afecta la estructura .....	26
3 Transferencia de masa en estado no estacionario.....	26
a Difusión en una placa plana con resistencia externa despreciable .....	28
D COMPUESTOS BIOACTIVOS.....	29
1 Ácido ascórbico.....	29

2 Compuestos fenólicos .....	30
3 Carotenoides totales .....	31
E EFECTO DEL HORNEADO SOBRE COMPUESTOS BIOACTIVOS.....	32
1 Ácido ascórbico.....	32
2 Compuestos fenólicos .....	32
3 Carotenoides totales .....	33
IV JUSTIFICACIÓN.....	34
V OBJETIVOS.....	36
A OBJETIVO GENERAL.....	36
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	36
VI MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
A MATERIALES.....	38
1 Materia prima .....	38
B MÉTODOS .....	38
1 Análisis proximal .....	38
a Contenido de humedad .....	38
b Proteína .....	39
c Grasas .....	40
d Cenizas.....	40
e Fibra cruda .....	41
f Carbohidratos .....	42
2 Preparación de la muestra .....	42
3 Horneado .....	42
4 Parámetros fisicoquímicos .....	43
a Actividad de agua .....	43
b Fracturabilidad.....	43
c Color y diferencia total de color .....	44
d pH.....	44
e Acidez titulable .....	45
f Sólidos solubles totales .....	45
5 Compuestos bioactivos .....	45
a Ácido ascórbico .....	45



b Compuestos fenólicos .....	47
c Carotenoides totales .....	48
6 Cinéticas de horneado .....	49
7 Almidón .....	49
a Análisis microestructural .....	49
1) Microscopía electrónica de barrido (MEB) .....	49
2) Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	50
8 Parámetros de difusión .....	50
a Contenido de humedad inicial .....	50
b Contenido de humedad crítico .....	50
c Contenido de humedad en el equilibrio .....	51
d Semiespesor .....	51
e Densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y coeficiente de transferencia de masa ( $k_v$ ) .....	51
f Difusividad efectiva constante .....	52
1) Método de pendientes por subperiodos .....	52
2) Método de aproximaciones sucesivas .....	52
g Difusividad efectiva variable .....	53
1) Función del tiempo al cuadrado .....	53
9 Distribución de Weibull para modelado de difusividad efectiva, contenido de humedad y fracturabilidad .....	56
10 Métodos estadísticos .....	59
a Análisis proximal, parámetros fisicoquímicos y compuestos bioactivos ..	59
b Contraste del camote horneado respecto al fresco .....	60
c Cinéticas de variables de calidad .....	60
d Parámetros de difusión .....	60
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	62
A RODAJAS DE CAMOTE FRESCAS .....	63
1 Análisis proximal .....	63
2 Parámetros fisicoquímicos .....	65
a Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	65
b Fracturabilidad ( $F$ ) .....	65
c Color ( $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ ) .....	65
d pH .....	67

e Acidez titulable .....	67
f Sólidos solubles totales .....	67
3 Compuestos bioactivos .....	67
a Ácido ascórbico .....	67
b Compuestos fenólicos .....	69
c Carotenoides totales .....	69
B RODAJAS DE CAMOTE HORNEADAS.....	69
1 Parámetros fisicoquímicos .....	69
a Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	71
b Fracturabilidad ( $F$ ) .....	72
c Color y diferencia total de color ( $\Delta E$ ) .....	72
2 Compuestos bioactivos .....	73
a Ácido ascórbico ( $AA$ ) .....	73
b Contenido de compuestos fenólicos ( $CF$ ) .....	75
c Contenido de carotenoides totales ( $CT$ ) .....	76
C CINÉTICAS DE HORNEADO DE RODAJAS DE CAMOTE .....	76
1 Cinéticas de la razón del contenido de humedad ( $X/X_0$ ) .....	76
2 Cinéticas de actividad de agua ( $a_w$ ) .....	78
3 Cinéticas de fracturabilidad ( $F$ ) .....	80
4 Cinéticas de diferencia total de color ( $\Delta E$ ) .....	82
5 Cinéticas de contenido de ácido ascórbico ( $AA$ ) .....	84
6 Cinéticas de contenido de compuestos fenólicos ( $CF$ ) .....	87
7 Cinéticas de carotenoides totales ( $CT$ ) .....	89
D ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE RODAJAS DE CAMOTE FRESCAS Y HORNEADAS.....	91
1 Microscopía electrónica de barrido .....	91
2 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	93
E PARÁMETROS DE DIFUSIÓN DE RODAJAS DE CAMOTE HORNEADAS. 99	
1 Contenido de humedad inicial, crítico y en el equilibrio.....	99
2 Densidad de flujo de masa y coeficiente de transferencia de masa.....	101
3 Difusividad efectiva constante.....	103
a Método de Pendientes por Subperiodos (MPS) .....	103
b Método de Aproximaciones Sucesivas (MAS).....	107
4 Difusividad efectiva variable.....	108
a Difusividad Efectiva en Función del Tiempo al Cuadrado (FTC) .....	108

F MODELADO DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA, CONTENIDO DE HUMEDAD Y FRACTURABILIDAD CON LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL .....	110
VIII CONCLUSIONES .....	123
IX BIBLIOGRAFÍA .....	126
ABREVIATURAS.....	143
ANEXOS .....	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1	Tubérculo de camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.).	11
2	Planta de camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.).	16
3	Variedades de camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.) según el color de la cáscara y de la pulpa.	17
4	Diversidad de formas de camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.).	19
5	Cinéticas de la razón de contenido de humedad ( $X/X_0$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 0.07$ , $\alpha = 0.05$ , $n = 3$ ).	76
6	Cinéticas de actividad de agua ( $a_w$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 0.19$ , $\alpha = 0.05$ , $n = 3$ ).	78
7	Cinéticas de fracturabilidad ( $F$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 6.30$ N, $\alpha = 0.05$ , $n = 9$ ).	80
8	Cinéticas de diferencia total de color ( $\Delta E$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 5.5$ , $\alpha = 0.5$ , $n = 9$ )	82
9	Cinéticas de ácido ascórbico ( $AA$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 4.8$ mg <sub>AA</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> , $\alpha = 0.5$ , $n = 3$ )	84
10	Cinéticas de compuestos fenólicos ( $CF$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 14.3$ mg <sub>EAG</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> , $\alpha = 0.5$ , $n = 3$ )	87
11	Cinéticas de carotenoides totales ( $CT$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 1.7$ mg <sub>EBC</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> , $\alpha = 0.5$ , $n = 3$ ).	89
12	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista (a) longitudinal y (b) transversal de rodajas de camote frescas.	91
13	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 100 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 16, (d) 28, (e) 40 y (f) 46 min.	93
14	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 120 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 8, (d) 20 y (e) 32 min.	94

15	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 140 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 8, (c) 12, (d) 16 y (e) 24 min.	95
16	Gráficos de infrarrojo con transformada de Fourier para rodajas de (a) camote fresco, (b) escaldado, y horneado a (c) 100 °C por 28 min, (d) 120 °C por 20 min y (e) 140 °C por 16 min.	96
17	Gráficos de difusividad efectiva calculada con diferentes métodos y de la predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 100 °C.	103
18	Gráficos de difusividad efectiva calculada con diferentes métodos y de la predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 120 °C.	104
19	Gráficos de difusividad efectiva calculada con diferentes métodos y de la predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 140 °C.	105
20	Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos obtenidos a 100 °C.	110
21	Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos obtenidos a 120 °C.	111
22	Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos obtenidos a 140 °C.	112
23	Gráficos de fuerza de fractura en el PVD modelada con la distribución de probabilidad de Weibull a (a) 100, (b) 120 y (c) 140 °C.	114
24	Gráficos de los parámetros normalizados utilizados para el modelado de la fuerza de fractura con la distribución de probabilidad de Weibull a (a) 100, (b) 120 y (c) 140 °C.	116
25	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 100 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 16, (d) 28, (e) 40 y (f) 46 min.	118
26	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 120 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 8, (d) 16 y (e) 32 min.	119

27	Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 140 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 8, (c) 12, (d) 16 y (e) 24 min.	120
----	---	-----

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág
1	Clasificación taxonómica del camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.).	15
2	Composición química del camote ( <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.).	20
3	Composición proximal de camote fresco (cv. Beauregard).	63
4	Parámetros fisicoquímicos de rodajas de camote fresco.	65
5	Compuestos bioactivos de rodajas de camote fresco.	67
6	Contraste de parámetros fisicoquímicos de rodajas de camote fresco y horneadas a diferentes temperaturas.	69
7	Contraste de compuestos bioactivos de rodajas de camote fresco y horneadas a diferentes temperaturas.	73
8	Contenido de humedad inicial, crítico y de equilibrio en las cinéticas de horneado a diferentes temperaturas.	99
9	Densidad de flujo de masa y coeficiente de transferencia de masa a diferentes temperaturas.	100

## I RESUMEN

El camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) es el tercer tubérculo más producido a nivel mundial, el cual es importante debido a sus propiedades nutrimentales y funcionales, como su contenido de ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales. Generalmente, se consume horneado, cocido al vapor, en puré o frito y se emplea para la obtención de productos como gelatinas, helados, papillas para bebé, dulces, productos de panadería y botanas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la temperatura de horneado sobre las propiedades fisicoquímicas y compuestos bioactivos de botanas de camote y analizar la cinética de estas variables durante el proceso en función de la temperatura y el tiempo, así como evaluar los parámetros de difusión durante el horneado. En este estudio se obtuvieron botanas de camote en rodajas mediante horneado, proceso que induce cambios en los compuestos y atributos de calidad del alimento, por lo que se estudió el efecto de la temperatura de horneado sobre propiedades fisicoquímicas, compuestos bioactivos y atributos de calidad al producir las rodajas de camote tipo botana. Se llevó a cabo un análisis proximal (contenido de humedad, proteína, grasa, cenizas, fibra cruda y carbohidratos) para conocer la composición de la materia prima, fisicoquímico (actividad de agua,  $a_w$ ; fracturabilidad,  $F$  y color,  $\Delta E$ ) y de compuestos bioactivos (ácido ascórbico,  $AA$ ; compuestos fenólicos,  $CF$  y carotenoides totales,  $CT$ ) para estudiar estas propiedades en el camote fresco y analizar de qué manera las está afectando el proceso de horneado, además de conocer las características fisicoquímicas y nutrimentales de las botanas obtenidas. Se realizó un estudio microestructural



(microscopía electrónica de barrido y espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier) del almidón de camote nativo y procesado, esto para conocer de manera interna que está pasando con el almidón y la estructura de las rodajas de camote durante el horneado, además las microfotografías permitieron demostrar físicamente que ocurre con la fracturabilidad debida a la porosidad y difusividad de las rodajas de camote. Se analizaron los parámetros de difusión (contenido de humedad inicial,  $X_0$ ; contenido de humedad crítico,  $X_c$ ; contenido de humedad en el equilibrio,  $X_\infty$ ; densidad de flujo de masa,  $N_c$ ; coeficiente de transferencia de masa,  $k_Y$  y difusividad efectiva,  $D_e$ ) de las botanas de camote horneadas a 100, 120 y 140 °C, estos parámetros permitieron explicar qué sucede dentro de las rodajas de camote y explicar cómo se da la transferencia de masa en el proceso de horneado. Se llevó a cabo un análisis mediante estadística descriptiva para las variables; contenido de humedad, proteína, grasas, cenizas, fibra cruda y carbohidratos; además, se emplearon dos diseños completamente al azar: el primero con el factor temperatura (100, 120 y 140 °C) para las variables de respuesta;  $a_w$ ,  $F$ ,  $\Delta E$ ,  $AA$ ,  $CF$ ,  $CT$ ,  $X_0$ ,  $X_c$ ,  $X_\infty$ ,  $N_c$ ,  $k_Y$  y  $D_e$ , y el segundo con dos factores temperatura (100, 120 y 140 °C) y tiempo (cada 4 minutos hasta el final del horneado) para las cinéticas de: razón de contenido de humedad ( $X/X_0$ ),  $a_w$ ,  $F$ ,  $\Delta E$ ,  $AA$ ,  $CF$  y  $CT$ , para ambos análisis se utilizó la prueba de Fisher con un  $\alpha = 0.05$  para la comparación de medias. Los valores de  $a_w$ ,  $F$ ,  $AA$ ,  $CF$  y  $CT$  disminuyeron al incrementar la temperatura y el tiempo de horneado, mientras que los valores de  $\Delta E$  mostraron un aumento con dichos factores. Las cinéticas  $X/X_0$ ,  $a_w$ ,  $AA$ ,  $CF$  y  $CT$  mostraron una disminución de estas variables en función del tiempo y de la temperatura de horneado. La cinética de  $F$  mostró un comportamiento de aumento hasta un máximo y su posterior

disminución en función del tiempo y de la temperatura; mientras que, la cinética de  $\Delta E$  aumentó con los factores estudiados. Las microfotografías de las rodajas de camote muestran el cambio que sufrieron los espacios celulares por efecto del proceso de horneado. Los gráficos de espectroscopia infrarroja muestran cambios en la transmitancia de los grupos orgánicos debidos al efecto de la temperatura de horneado. No se encontró diferencia en las variables  $X_0$ ,  $X_c$  y  $X_\infty$ , mientras que,  $N_c$  y  $k_v$  disminuyeron por efecto de la temperatura. El método de difusividad en función del tiempo al cuadrado y el método de la distribución de Weibull demostraron que la difusividad efectiva presenta un comportamiento variable durante el proceso de horneado.

## ABSTRACT

Sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) is the third most produced tuber globally, and it is important due to its nutritional and functional properties, such as its content of ascorbic acid, phenolic compounds, and total carotenoids. It is typically consumed baked, steamed, mashed, or fried, and is used to make products like gelatin, ice cream, baby food, candies, baked goods, and snacks. The aim of this research was to evaluate the effect of baking temperature on the physicochemical properties and bioactive compounds of sweet potato snacks and to analyze the kinetics of these variables during the process as a function of temperature and time, as well as to assess diffusion parameters during baking. In this study, sweet potato snacks in slices were obtained through baking, a process that induces changes in the compounds and quality attributes of the food. Therefore, the effect of baking temperature on physicochemical properties, bioactive compounds, and quality attributes was studied while producing sweet potato snack type slices. A proximal analysis (moisture, protein, fat, ash, crude fiber, and carbohydrates content) was performed to understand the composition of the raw material, physicochemical analysis (water activity,  $a_w$ ; fracturability,  $F$ ; and color,  $\Delta E$ ), and bioactive compound analysis (ascorbic acid,  $AA$ ; phenolic compounds,  $PC$ ; and total carotenoids,  $TC$ ) to study these properties in fresh sweet potato and analyze how the baking process is affecting them, as well as to understand the physicochemical and nutritional characteristics of the obtained snacks. A microstructural study (scanning electron microscopy, SEM, and Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) of native and processed sweet potato starch was conducted to understand what happens

internally with the starch and the structure of the sweet potato slices during baking. Furthermore, the microphotographs visually demonstrated what occurs with fracturability due to the porosity and diffusivity of the sweet potato slices. Diffusion parameters (initial moisture content,  $X_0$ ; critical moisture content,  $X_c$ ; equilibrium moisture content,  $X_\infty$ ; mass flow density,  $N_c$ ; mass transfer coefficient,  $k_Y$ ; and effective diffusivity,  $D_e$ ) of sweet potato snacks baked at 100, 120, and 140 °C were analyzed. These parameters helped explain what happens inside the sweet potato slices and how mass transfer occurs during the baking process. A descriptive statistical analysis was performed for the variables; moisture content, protein, fat, ash, crude fiber, and carbohydrates. Additionally, two completely randomized designs were used: the first with the temperature factor (100, 120, and 140 °C) for the response variables;  $a_w$ ,  $F$ ,  $\Delta E$ ,  $AA$ ,  $PC$ ,  $TC$ ,  $X_0$ ,  $X_c$ ,  $X_\infty$ ,  $N_c$ ,  $k_Y$ , and  $D_e$ , and the second with two factors; temperature (100, 120, and 140 °C) and time (every 4 minutes until the end of baking) for the kinetics of moisture content ratio ( $X/X_0$ ),  $a_w$ ,  $F$ ,  $\Delta E$ ,  $AA$ ,  $PC$ , and  $TC$ . For both analyses, Fisher's test was used with  $\alpha = 0.05$  for mean comparisons. The  $a_w$ ,  $F$ ,  $AA$ ,  $PC$ , and  $TC$  decreased as baking temperature and time increased, while  $\Delta E$  showed an increase with these factors. The kinetics of  $X/X_0$ ,  $a_w$ ,  $AA$ ,  $PC$ , and  $TC$  showed a decrease in these variables as a function of baking time and temperature. The kinetics of  $F$  showed an increase up to a maximum and then a subsequent decrease as a function of time and temperature, while the kinetics of  $\Delta E$  increased with the studied factors. The microphotographs of the sweet potato slices showed the change in cellular spaces due to the baking process. The infrared spectroscopy graphs showed changes in the transmittance of organic groups due to the effect of baking temperature. No differences were found in the

variables  $X_0$ ,  $X_c$ , and  $X_\infty$ , while  $N_c$  and  $k_Y$  decreased due to temperature. The diffusivity method as a function of time squared and the Weibull distribution method demonstrated that the effective diffusivity shows variable behavior during the baking process.

## II INTRODUCCIÓN

El camote, *Ipomoea batatas* (L.) Lam., proviene de una planta dicotiledónea que pertenece a la familia Convolvulaceae, la parte comestible es su raíz tuberosa. Es nativo de las regiones tropicales de América y se distingue por su particular pulpa suave y su contenido de nutrimentos (Zengin y col 2017).

Este tubérculo ha adquirido importancia considerable en la última década debido a su contenido nutrimental, especialmente por la vitamina C, fibra dietaria, hierro, minerales, provitamina A, carotenoides y compuestos fenólicos (Onwude y col 2018). Con base en el color de la pulpa y de la cáscara, el camote se clasifica en blanco, amarillo, naranja y púrpura (Yong y col 2018).

El horneado es un método popular para cocinar el camote. Los consumidores disfrutan el olor y el sabor del camote horneado. Este proceso cambia la composición de azúcares y la morfología del almidón en el camote, lo que origina un olor dulce y cambios en su textura (Chan y col 2012).

Por otro lado, se sabe que actualmente, hay un incremento en la búsqueda de productos bajos en grasa o sin grasa añadida, lo que hace que la demanda de botanas horneadas incremente en comparación con las botanas fritas. Sin embargo, las propiedades de los productos horneados se ven afectadas por parámetros como el contenido de humedad y la temperatura de horneado (Oluwole y col 2014).

Durante el proceso de horneado se presenta la transferencia de masa, a causa de un gradiente en la humedad del aire, esto provoca que el contenido de humedad se transfiera desde el alimento hacia el aire que lo rodea (Fellows 2017).

Por ende, es necesario estudiar la forma en que el proceso de horneado influye sobre las propiedades fisicoquímicas, los compuestos bioactivos y los atributos de calidad al generar botanas de camote en rodajas.

Varios autores han investigado el horneado o secado de camote, ya sea entero, cortadas en cubos o en rodajas, e informado sobre la fracturabilidad, variables de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales del producto en condiciones constantes de temperatura y tiempo. Sebben y col (2017) investigaron el efecto del secado por microondas y aire caliente en la producción de harina de camote de pulpa de naranja. Onwude y col (2018) estudiaron la influencia del secado por convección en la cinética, el consumo de energía, el color y la microestructura del camote. Además, Cui y Zhu (2019) publicaron un estudio sobre las propiedades fisicoquímicas y compuestos bioactivos de harinas de camote tratadas con alta presión hidrostática. Monteiro y col (2020) monitorearon la evolución de la humedad, la actividad del agua, la temperatura, el color y la fuerza de fractura de camote durante el secado con microondas al vacío. Schweinberger y col (2020) compararon el secado por convección, el secado por microondas y la liofilización para la producción de harinas nutritivas a partir de pulpa de camote anaranjado y descubrieron que el secado por microondas y la liofilización daban como resultado menores pérdidas de carotenoides. Sin embargo, es necesario analizar el impacto del horneado sobre las variables de calidad, así como el comportamiento del contenido de humedad, fracturabilidad, actividad del agua, diferencia total de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales en función del tiempo de horneado y la temperatura de las rodajas de

camote. Este análisis tiene como objetivo proporcionar una explicación de los cambios en estas variables durante el proceso y explorar cualquier relación potencial entre ellas. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de la temperatura de horneado sobre las variables fisicoquímicas y compuestos bioactivos de botanas de camote, y analizar el comportamiento cinético de estas variables durante el proceso en función de la temperatura y el tiempo.



### III REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### A CAMOTE

##### 1 Generalidades

El camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) es el séptimo cultivo más importante del mundo. Además de ser una fuente de energía, contiene diversos subproductos útiles (Wang y col 2018). Su tubérculo, es el principal órgano cosechado, que funciona principalmente en el almacenamiento y reproducción de nutrimentos (**Figura 1**).

Es originario de Centroamérica y Sudamérica (regiones tropicales de América), el camote es una raíz comestible que se distingue por su particular pulpa suave, sabor dulce y contenido de nutrimentos. Su cultivo se realiza en climas cálidos y es capaz de reproducirse en cualquier tipo de suelos (Wei y col 2017; Zengin y col 2017).

Existen diversas variedades de camote en el mundo, estas se diferencian en el tamaño, la forma, el color de la cáscara (blanca, crema, amarilla, naranja, rosa y roja) y de la pulpa (blanca, crema, naranja, amarilla y púrpura) (Gasa y col 2022).

El nombre de este tubérculo proviene del náhuatl *camotli* que significa “raíz comestible”. Al llegar a México, fue cultivado y utilizado por las culturas mesoamericanas para la elaboración de muchos platillos (SADER 2016).

Es nativo de las regiones tropicales de América y considerado un vegetal de raíz debido a sus raíces de almacenamiento grandes, almidonosas y sabor dulce.



**Figura 1.** Tubérculo de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.).

El camote presenta un contenido alto de: carbohidratos, fibra, carotenoides, minerales y otros nutrimentos, cuya concentración depende de la variedad, las diferencias en las condiciones del crecimiento, del procesamiento que recibe y las variaciones en el lugar y tiempo de cosecha (Waidyarathna y col 2021). La aceptación del consumidor depende de la apariencia externa del tubérculo, así como el sabor, los que son principalmente afectados por su composición bioquímica (Wang y col 2018).

Las raíces comestibles tienen un alto contenido de azúcar, un olor deseable al ser cocinado y múltiples compuestos bioactivos con beneficios nutrimentales y a la salud (Wei y col 2017).

Es considerado un alimento que puede ayudar a combatir la malnutrición debido a su alto contenido nutrimental, su fácil cultivo y productividad. Además del alto contenido de vitaminas, aporta carbohidratos, fibra y otros micronutrimentos, como minerales esenciales (potasio, manganeso, hierro y calcio). Es naturalmente libre de grasas y de colesterol, bajo en sodio y con un menor contenido energético que las papas (Zengin y col 2017).

Sus propiedades nutraceuticas contribuyen en la prevención de la hipertensión, estrés, diabetes, anemia y hemorragias (SADER 2016).

Se ha reportado que su composición otorga beneficios, tales como, aporte nutrimental, propiedades cardioprotectoras, hepatoprotectoras, antiobesogénicas, antienvjecimiento, antidiabéticas y antiulcerogénicas. Por lo que, se promueve como un alimento funcional en enfermedades crónico-degenerativas, para disminuir su incidencia y prevalencia (Vidal y col 2018). Además, se han realizado estudios

sobre sus propiedades antioxidantes, antibacterianas y anticarcinogénicas (Naz y col 2017).

La planta de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. es usada para consumo humano, alimento para ganado y como materia prima para fines industriales. Es cultivado en regiones tropicales, subtropicales y templadas alrededor del mundo. El camote es considerado como uno de los cultivos económicos más prometedores debido a su alto rendimiento y fuerte capacidad de resistencia a diferentes condiciones ambientales, de suelo y de temperatura (Wu y col 2015).

En años recientes, el camote ha sido un tema central de investigación debido a sus propiedades nutrimentales y funcionales. El almidón es uno de los componentes mayoritarios en las raíces del camote, por lo que es utilizado como ingrediente en productos como tallarines, sopas, salsas y botanas (Yong y col 2018). También, ha sido usado en helados, productos de panadería y confitería, jarabe de almidón y en la industria cervecera para producción de etanol (Zhou y col 2017).

El camote generalmente es horneado, cocido al vapor, frito, procesado en almíbar, en puré o en rodajas finas horneadas crujientes. El método más popular para procesar el camote es frito a profundidad en aceite, el cual se utiliza para elaborar botanas (Rahman y col 2017).

El camote es uno de los cultivos más importantes, versátiles y menos aprovechados del mundo (Orellana-Martínez 2018).

### **a Taxonomía**

El camote es una planta dicotiledónea, que pertenece a la familia Convolvulaceae y su clasificación taxonómica se muestra en el **Cuadro 1**.

### **b Características botánicas**

La planta de camote (**Figura 2**) es perenne, se desarrolla por medio de fragmentos de guía, con longitud de 30 a 40 cm, de los cuales se planta 2/3 partes, se extiende horizontalmente sobre el suelo y forma un follaje bajo (Vidal y col 2018).

Posee una raíz tuberosa que se desarrolla en los nudos del tallo subterráneo y puede alcanzar hasta 30 cm de longitud y 20 cm de diámetro. Su forma es alargada en los extremos y presenta una protuberancia central. El tallo, conocido como guía, varía en longitud de acuerdo con la variedad. Las hojas se desarrollan en espiral en la guía, varían en tamaño y forma según el cultivar, puede ser acorazonada, hastada, dentada o trilobulada. El color, por lo regular, es verde y en algunos casos tiene una pigmentación púrpura incluso en el tallo, las flores están agrupadas en inflorescencias, con una longitud de 20 cm aproximadamente, con forma de campana, presentan una variación de colores que va desde un verde pálido a un púrpura oscuro (Vidal y col 2018).

La porción comestible es la raíz tuberosa, cuya cáscara y pulpa varían de color, estas pueden ser blanca, crema, amarilla, naranja, roja-morada, morada, con intensidades fuertes y débiles (**Figura 3**).

**Cuadro 1.** Clasificación taxonómica del camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam).

---

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Convolvulaceae
Género	<i>Ipomoea</i>
Especie	<i>Batatas</i>

---

**Fuente:** CONABIO 2009.



**Figura 2.** Planta de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.).



**Figura 3.** Variedades de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) según el color de la cáscara y de la pulpa (Cobeña y col 2017).



La forma varía en función del cultivar, las hay esféricas o redondas, obovada, ovada, oblonga, largo elíptica, largo oblonga, elíptica y largo irregular curvado (**Figura 4**), pueden ser lisas, con surcos o hendiduras longitudinales. Mientras que, la superficie varía de suave y lisa a rugosa, y la corteza puede variar de 1 a 4 mm (Cobeña y col 2017).

## **2 Contenido nutrimental**

El camote ha ganado una importancia considerable en la última década debido a su alto contenido nutrimental, especialmente por la vitamina C, fibra, minerales, provitamina A, carotenoides y compuestos fenólicos, cuya concentración puede variar, según el cultivar analizado (Onwude y col 2018). La composición química del camote se muestra en el **Cuadro 2**.

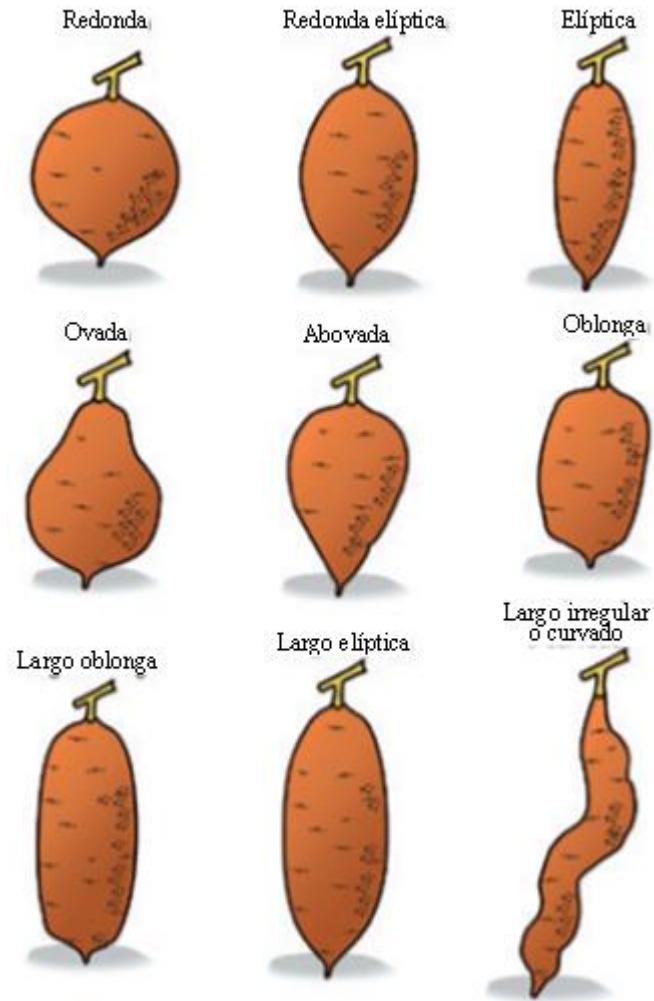
## **3 Importancia**

### **a Importancia económica**

#### **1) Producción mundial**

El camote es el tercer cultivo más importante a nivel mundial dentro del grupo de raíces y tubérculos, precedido por la papa y la yuca. Es uno de los tubérculos comestibles más antiguos, utilizados durante siglos; pero con poco aprovechamiento (Cobeña y col 2017).

Es cultivado alrededor del mundo con una producción mundial de 150 millones de toneladas. Es de fácil propagación y pocos requerimientos nutricionales por lo tanto sus costos de producción son bajos (Vidal y col 2018).



**Figura 4.** Diversidad de formas de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) (INIA 2017).

**Cuadro 2.** Composición química del camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.).

Composición	Por 100 g
Energía (kcal)	105
Agua (g)	72.84
Proteína (g)	1.65
Lípidos (g)	0.3
Cenizas (g)	0.95
Carbohidratos (g)	24.26
Fibra (g)	3.0
Ca <sup>2+</sup> (mg)	22.0
Fe <sup>2+</sup> (mg)	0.59
P (mg)	28
K <sup>+</sup> (µg/mL)	337.0
Vitamina C (mg)	22.7
Vitamina A (UI)	14.55

**Fuente:** USDA 2005

Los contenidos se reportan para cada 100 g de producto fresco.

En China se produce el 80 % del camote, mientras la producción de América Latina es de aproximadamente el 4 % (Wu y col 2015; Cobeña y col 2017).

## **2) Producción nacional**

En México se cultiva desde tiempos ancestrales y en la actualidad se producen variedades de pulpa blanca, amarilla, naranja, rosada o morada, en 26 estados de la República (Vidal y col 2018).

La producción anual de camote en México es de más de 126 mil toneladas, con: Guanajuato, Michoacán y Veracruz como los principales productores (SIAP 2019).

## **4 Procesamiento del camote**

A pesar de tener un gran potencial como alimento, el camote se consume muy poco en México y se utiliza como alimento alternativo o como golosina. El camote se aprovecha básicamente como un alimento complementario y puede ser de gran importancia local en las regiones productoras (Basurto y col 2015).

El camote generalmente se cocina horneado, hervido, al vapor o frito. Estos procesos causan cambios en las características físicas y en la composición química del camote (Dincer y col 2011).

### **a Productos derivados del camote**

En México, el tubérculo comúnmente es utilizado para obtener productos como helados, gelatinas, flanes, puré, sopas, alimento para bebés y botanas fritas u horneadas (Vidal y col 2018).

## **b Botanas de camote**

En años recientes la obtención de botanas saludables ha sido objeto de investigación y de interés por parte de los consumidores y la industria alimentaria. Por lo que se han realizado diversos estudios para la obtención de botanas a partir de camote y analizar cómo se afectan sus características con el procesamiento. Yang y col (2012) observaron que, al obtener botanas de camote fritas al vacío, el contenido de carotenoides totales y antocianinas disminuía con el procesamiento, pero era mejor que en las botanas fritas tradicionalmente. Sus botanas (fritas al vacío) tuvieron buena aceptabilidad en el color, el sabor y la textura, además eran más crujientes. Rahman y col (2017) estudiaron botanas de camote fritas con aire caliente (150 °C, 12 min) y encontraron que las botanas disminuyeron su contenido de grasa en 90 %, presentaban un color más claro y mejor textura (crujibilidad), además que su apariencia era comparable con la de muestras fritas en aceite. Phomkaivon y col (2018) obtuvieron botanas expandidas hechas a base de harina de camote morado con alto contenido de antocianinas y alta actividad antioxidante. Monteiro y col (2022) realizaron el estudio de chips de camote secadas en microondas rotatorio al vacío (60 °C) y concluyen que las chips tenían poros grandes e irregulares debido a la rápida evaporación del agua al vacío, y que las curvas de fuerza de penetración fueron irregulares, típicas de productos crujientes con mayor aceptación. Por su parte, Feitoza y col (2023) trabajaron con botanas hechas a partir de camote y demostraron su potencial probiótico, ya que concluyen que hubo impacto positivo en la microbiota intestinal humana, lo que podría convertir a dichas botanas en opciones de snacks no lácteos potencialmente probióticos. Mientras

que, Goncalves y col (2023) obtuvieron botanas de camote secadas a diferentes temperaturas (60, 65, 70, 75 y 80 °C) durante 5 a 200 min, con velocidad de secado de 2.3 m/s, y encontraron que los compuestos fenólicos se redujeron hasta un 70 %, los carotenoides totales tuvieron una mejor estabilidad y se obtuvo una textura crujiente. Además, indican que para obtener un contenido de humedad que garantice la estabilidad de las botanas (< 10 %) fue necesario aplicar temperaturas altas (>75 °C) y tiempos largos de secado (120 min), y que el procesamiento a 75 °C durante 200 min permitió la producción de chips con apreciable calidad sensorial (color, sabor y textura), buenos valores de crujibilidad (>4 N/mm) y buen contenido de carotenoides totales (42 mg<sub>EBC</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>). Los autores que han investigado la obtención de botanas por diferentes métodos que no es el freído tradicional concluyen que se obtienen buenas propiedades físicas, sobre todo en la crujibilidad que es una característica importante en las botanas y además, se logra la retención de compuestos bioactivos, también mencionan que el camote podría ser utilizado como materia para otro tipo de botanas y que puede ser una fuente natural potencial de colorantes, carotenoides y antioxidantes (camote morado) en productos alimentarios.

Por lo que las botanas de camote horneadas obtenidas en este estudio pueden ser una alternativa para producir botanas saludables con apariencia y textura mejorada, podrían ayudar a aumentar el consumo de vegetales y serían apropiadas para las personas que ingieren grasas de manera excesiva y están interesados en una alimentación más saludable ya que tienen nula adición de grasa, además que

los alimentos saludables, nutritivos y convenientes han llamado la atención de los consumidores y representan una oportunidad para la industria alimentaria.

## **B HORNEADO**

### **1 Generalidades**

El proceso de horneado se basa en la preparación del alimento dentro de un horno al someterlo a una temperatura elevada (Nieto 2014).

En el horneado, el fluido de contacto es el aire a alta temperatura, para transferir calor, superior a la temperatura de ebullición del agua, sin embargo, el tiempo de horneado es mayor que al utilizar agua, ya que la conductividad térmica del aire es menor que la del agua. Los alimentos horneados tienen buen sabor y desarrollan durante el proceso una corteza dorada y crocante por la deshidratación superficial, característica similar al freído con la ventaja adicional de no incorporar grasa al alimento, lo que lo hace más saludable (Moncada y Gualdrón 2006).

Durante el horneado se presentan de manera simultánea la transferencia de calor y de masa. El calor es transferido por radiación, convección y conducción, mientras que el contenido de humedad es transferido desde el alimento hacia el aire que lo rodea, el que después es removido del horno. Cuando el alimento es colocado en el horno caliente, el bajo contenido de humedad del aire en el horno crea un gradiente en la humedad del aire, lo que causa que el contenido de humedad en la superficie del alimento se evapore, esto provoca que la humedad del interior del alimento se traslade a la superficie. La pérdida de humedad es

determinada por las características del alimento, el movimiento del aire en el horno y la velocidad de la transferencia de calor (Fellows 2017).

El horneado provoca cambios en la textura, el color, el olor y el sabor de los alimentos, ya que el contenido de humedad y la composición de carbohidratos, lípidos y otros componentes, serán afectados por la temperatura, la duración del proceso y el contenido de humedad (Fellows 2017).

## **C TRANSFERENCIA DE MASA**

### **1 Generalidades**

La transferencia de masa se lleva a cabo cuando el componente de una mezcla migra, en una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentración entre dos puntos. La difusión molecular puede definirse como la transferencia de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y desordenados de las moléculas. Dicha difusión se da de una región de alta concentración a otra de baja concentración (Geankoplis 2013).

### **2 Difusión molecular en sólidos**

La transferencia en sólidos se clasifica en dos tipos de difusión: la difusión que se rige por la ley de Fick y que no depende primordialmente de la estructura del sólido; y la difusión en sólidos porosos, en la que la estructura real y los canales vacíos tienen gran importancia. Al trabajar con un alimento cuya estructura presenta espacios vacíos, la transferencia que predomina es la difusión en sólidos porosos (Geankoplis 2013).



### **a Difusión en sólidos porosos en los que afecta la estructura**

En este caso, interesan los sólidos porosos que tienen canales o espacios vacíos interconectados, los cuales afectan a la difusión. En caso de que los espacios vacíos estén totalmente llenos de agua en fase líquida, la concentración de soluto en agua en el punto 1 es  $X_{A_1}$  y en el punto 2 es  $X_{A_2}$ . Al difundirse el agua por los conductos vacíos, el soluto sigue una trayectoria sinuosa desconocida que es mayor que  $(x_2 - x_1)$  por un factor  $\tau$ , llamado tortuosidad (Geankoplis 2013). Al aplicar la ecuación para la difusión en estado estacionario de A en B se obtiene:

$$N_A = \frac{\varepsilon D_{AB} (X_{A_1} - X_{A_2})}{\tau (x_2 - x_1)} \quad (1)$$

donde  $N_A$  es la densidad de flujo molar del componente A ( $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $\varepsilon$  es la fracción de espacios vacíos o porosidad,  $D_{AB}$  es la difusividad de A en B ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) y  $\tau$  es la tortuosidad, factor de corrección de la trayectoria más larga que  $(x_2 - x_1)$ .

En muchos casos es conveniente combinar los términos en una expresión de difusividad efectiva ( $D_e$ ):

$$D_e = \frac{\varepsilon}{\tau} D_{AB} \quad (2)$$

### **3 Transferencia de masa en estado no estacionario**

Antes que se alcance el estado estacionario, debe transcurrir un cierto tiempo después de iniciar el proceso de transferencia de masa para que desaparezcan las condiciones de estado no estacionario (Geankoplis 2013).

Para deducir la ecuación de difusión en estado no estacionario en una dirección, para transferencia de masa, se considera que la masa se difunde en dirección  $x$  en un cubo constituido, cuyas dimensiones son  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  (Geankoplis 2013). La difusión en la dirección  $x$  está dada por:

$$N_{Ax} = - D_e \frac{\partial X_A}{\partial x} \quad (3)$$

El término  $\partial X_A / \partial x$  es la derivada parcial de  $X_A$  con respecto a  $x$  o la velocidad de cambio de  $X_A$  con respecto a  $x$  cuando la otra variable  $t$  se mantiene constante.

Al llevar a cabo un balance del componente A en términos molares en ausencia de generación, la velocidad de entrada y salida en  $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  son:

$$N_A|_x = - D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_x \quad (4)$$

$$N_A|_{x+\Delta x} = - D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \quad (5)$$

La velocidad de acumulación en  $\text{mol s}^{-1}$  para el volumen  $(\Delta x \Delta y \Delta z)$  en  $\text{m}^{-3}$  es:

$$\text{velocidad de acumulación} = (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial X_A}{\partial t} \quad (6)$$

El balance molar de A en  $\text{mol s}^{-1}$  es:

$$N_A|_x (\Delta y \Delta z) - N_A|_{x+\Delta x} (\Delta y \Delta z) = (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial X_A}{\partial t} \quad (7)$$

Al sustituir las ecuaciones (4), (5) y (6) en el balance molar de A y dividir entre el volumen  $(\Delta x \Delta y \Delta z)$  se obtiene:

$$-D_{AB} \frac{\left. \frac{\partial X_A}{\partial x} \right|_x - \left. \frac{\partial X_A}{\partial x} \right|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = \frac{\partial X_A}{\partial t} \quad (8)$$

Cuando  $\Delta x$  tiende a cero:

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} \quad (9)$$

La ecuación (9) relaciona la concentración con la posición y el tiempo, la cual es válida cuando se tiene una difusividad constante.

### **a Difusión en una placa plana con resistencia externa despreciable**

Para el caso de difusión en estado no estacionario, al considerar una sola dirección  $x$  en una placa de espesor  $2L$  y al considerar la difusividad efectiva de la ecuación (3) se tiene:

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} \quad (10)$$

El perfil inicial de concentración en la placa es uniforme con  $X = X_0$  para cualquier posición  $x$  dentro del sólido. La concentración del fluido en el medio circundante cambia repentinamente a  $X_\infty$ . Para un coeficiente de transferencia de masa muy alto en el exterior, la resistencia superficial es despreciable ( $Bi \geq 40$ ) y la concentración en la superficie es igual a la del fluido, que es  $X_\infty$  (Geankoplis 2013).

Por lo que la condición inicial y las de frontera son:

$$\begin{aligned} X(x,0) &= X_0 \\ X(-L,t) &= X_\infty \\ X(L,t) &= X_\infty \end{aligned} \quad (11)$$

La solución a este sistema para la concentración promedio  $\bar{X}$ , con difusividad efectiva constante, es dada por la siguiente serie infinita (Crank 1975):

$$\frac{\bar{X} - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}\right] \quad (12)$$

## **D COMPUESTOS BIOACTIVOS**

Los compuestos bioactivos presentes en los alimentos desempeñan un papel importante en la promoción de la salud humana, ya que contribuyen a la prevención de enfermedades y al mantenimiento de funciones fisiológicas clave. En el camote, compuestos como el ácido ascórbico, los fenólicos y los carotenoides totales, destacan por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Sin embargo, las condiciones de procesamiento, como el tratamiento térmico, puede modificar su contenido, biodisponibilidad y funcionalidad, afectando directamente sus beneficios nutrimentales (Vidal y col 2018).

### **1 Ácido ascórbico**

El ácido ascórbico (vitamina C) es una de las vitaminas hidrosolubles más importantes para los seres humanos y está asociada a una serie de funciones fisiológicas. Esta vitamina puede ser sintetizada por la mayoría de los animales y plantas, a partir de azúcar hexosa; sin embargo, los humanos y otros primates son incapaces de sintetizar este compuesto. Por lo tanto, la ingesta adecuada de ácido ascórbico en los alimentos es necesaria para el desarrollo adecuado del funcionamiento fisiológico, las frutas y las verduras son las fuentes naturales más ricas de vitamina C en la dieta humana, el contenido de ácido ascórbico en las frutas

se considera como un indicador para evaluar la frescura y la calidad nutrimental de las mismas (Damiano-Vásquez 2019).

El ácido ascórbico o vitamina C, es importante en la nutrición humana, principalmente por su capacidad antioxidante, protección celular, respuesta inmune y absorción de hierro. También, está presente en la síntesis de colágeno y estimula la producción de algunas hormonas. Funciona como un tampón o amortiguador redox que puede reducir (neutralizar) las especies reactivas de oxígeno. Es un cofactor de enzimas involucradas en la biosíntesis de hormonas y en la regeneración de otros antioxidantes; también regula la división y el crecimiento celular, participa en la transducción de señales y tiene funciones en varios procesos fisiológicos (Leandro-Laguna y col 2021).

## **2 Compuestos fenólicos**

Los fenólicos más representativos en el camote son los ácidos clorogénico, cafeico y ferúlico (Ooko-Abong y col 2020). Sin embargo, diversos factores pueden causar cambios químicos y físicos en estos compuestos, así como alterar su biodisponibilidad y bioaccesibilidad. Estos factores pueden incluir la temperatura y el tiempo de proceso, así como la exposición al oxígeno y la luz durante el tratamiento (Ribas-Agustí y col 2017; Ouyang y col 2021).

La ingesta diaria recomendada de compuestos fenólicos es de aproximadamente 1000 mg/día (Asfaw 2022).

Chiva-Blanch y Badimon (2017) reportaron que el promedio de consumo diario de compuestos fenólicos es 283 a 1000 mg/día en Francia, 500 a 1000 mg/día en

España, 700 mg/día en Italia, 890 mg/día en Finlandia, 534 mg/día en Brasil y 1500 mg/día en Japón.

El consumo de rodajas de camote horneadas puede ayudar a satisfacer los requerimientos de la ingesta diaria de compuestos fenólicos, debido a que se conocen los beneficios que aportan a la salud, debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y cardioprotectoras. Adicionalmente, pueden contribuir a disminuir los niveles de colesterol, regular el azúcar en la sangre y promover la salud digestiva (Alam 2021; Puma-Eugenio 2023).

### **3 Carotenoides totales**

Los carotenoides son una amplia familia de compuestos de isoprenoides de 40 átomos de carbono, contienen una serie de dobles enlaces conjugados que constituyen el grupo cromóforo de la molécula, responsable del color y de las propiedades de absorción de la luz (Damiano-Vásquez 2019).

Los carotenoides son considerados benéficos para la salud y el carotenoide más frecuente en el camote es el  $\beta$ -caroteno (Kourouma y col 2020).

Este compuesto es precursor de la vitamina A y puede ayudar a abordar un problema de salud mundial relacionado con la deficiencia de retinol o vitamina A (Schweinberger y col 2020).

Productos elaborados a base de camote pueden integrarse en la dieta humana como una estrategia para mejorar la ingesta de vitamina A (Kourouma y col 2020), estos compuestos bioactivos contribuyen a reducir el estrés oxidativo y el daño

causado por radicales libres, lo que promueve una función inmunológica mejorada, beneficios antienvjecimiento y reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares, cáncer y cataratas, mientras conserva la integridad de las membranas mucosas y la piel (Sebben y col 2017).

## **E EFECTO DEL HORNEADO SOBRE LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS**

El tratamiento térmico puede tener efecto tanto positivo como negativo sobre los compuestos bioactivos (ácido ascórbico, fenólicos y carotenoides totales). Por lo tanto, es fundamental estudiar dicho efecto y desarrollar procesos que equilibren la conservación de estos nutrimentos con la mejora de su biodisponibilidad para maximizar sus beneficios funcionales y obtener productos de calidad para la aceptación de los consumidores.

### **1 Ácido ascórbico**

El ácido ascórbico es extremadamente sensible al calor, la oxidación y el contacto con el oxígeno. Durante tratamientos térmicos como el horneado, su contenido puede disminuir significativamente, especialmente a altas temperaturas por tiempos prolongados. Esta pérdida puede reducir su capacidad antioxidante y su contribución al fortalecimiento del sistema inmune. Optimizar las condiciones térmicas es esencial para conservar este compuesto (Ejiofor y Oyenso 2019; Suárez y col 2020).

### **2 Compuestos fenólicos**

Los fenólicos, como los ácidos clorogénico, cafeico y ferúlico pueden sufrir alteraciones químicas y físicas debido al calor. Mientras que la degradación térmica

puede reducir su concentración, el tratamiento térmico controlado puede liberar compuestos fenólicos ligados a las paredes celulares, aumentando su biodisponibilidad. Las condiciones óptimas dependerán de la temperatura y el tiempo de exposición (Sui y col 2019; Alam 2021; Thao y col 2023).

### **3 Carotenoides totales**

Los carotenoides, como el  $\beta$ -caroteno, son moderadamente estables al calor. Durante el horneado, su biodisponibilidad puede mejorar gracias a la descomposición de matrices celulares que liberan estos compuestos. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden causar isomerización o degradación térmica, reduciendo su efectividad como antioxidantes y como precursores de la vitamina A (Schweinberger y col 2020; Asfaw 2022).



#### IV JUSTIFICACIÓN

El camote es un cultivo económico prometedor, ya que tiene un alto rendimiento y resistencia a diferentes condiciones ambientales. Se ha convertido en un foco de estudio debido a sus propiedades nutrimentales y funcionales, como su contenido de ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides. Se le han atribuido propiedades antioxidantes, cardioprotectoras, antidiabéticas, antienvjecimiento, antiobesidad y antiulcerogénicas. Además de ser una fuente natural y barata de energía por su contenido de almidón, dicha energía es liberada gradualmente, lo que resulta benéfico para las personas con diabetes. Es uno de los tubérculos comestibles más antiguos, sin embargo, su consumo es limitado y no se aprovechan sus beneficios nutraceuticos. Esto motiva a que se busquen presentaciones de este tubérculo que sean más aceptadas o de fácil acceso para el consumidor de tal manera que se rescaten y aprovechen sus propiedades nutraceuticas; además, como en la mayoría de las hortalizas su vida útil es corta, lo que hace necesario que se lleve a cabo un procesamiento para alargar su vida de anaquel. Por lo que, se desea obtener una botana horneada de rodajas de camote.

El horneado con aire caliente reduce el volumen y el contenido de humedad del alimento lo que facilita su conservación, almacenamiento y transporte. Durante el horneado se presenta transferencia de calor y de masa, esto favorece la eliminación rápida de humedad y provoca cambios en los atributos sensoriales del alimento como color, sabor, aroma y crujibilidad, lo que convierte a los alimentos horneados en un producto deseable por el consumidor. Además, la tendencia actual en la que los consumidores prefieren el consumo de botanas reducidas en grasa hace que la

aceptación por los productos horneados sea mayor, ya que no se le agrega ningún tipo de aceite, contrario al caso del freído.

En la obtención de dichas botanas, el horneado induce cambios en el contenido de humedad, el cual se debe mantener en un intervalo adecuado para tener una calidad del producto que sea aceptada por el consumidor.

En otras investigaciones se han analizado los cambios que se presentan en los parámetros de calidad por efecto del horneado en camote, generalmente entero, así como también, se ha estudiado la variación del contenido de humedad durante el secado de camote al considerar la difusividad efectiva constante y se han obtenido botanas mediante secado, fritura al vacío y fritura con aire caliente. Sin embargo, no se han encontrado investigaciones donde se obtengan rodajas de camote horneadas tipo botanas con nula adición de grasa, en donde además se analicen los cambios del contenido de humedad del camote durante el proceso al considerar la difusividad en función del tiempo; asimismo, no se ha reportado el efecto sobre los parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y funcionales de dichas botanas, ni se ha modelado la fracturabilidad durante el horneado de camote.

Por ello, el presente trabajo se enfocó en estudiar cómo el proceso de horneado influye sobre las propiedades fisicoquímicas, compuestos bioactivos y atributos de calidad en la producción de botanas de camote en rodajas.

## V OBJETIVOS

### A OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto del proceso de horneado sobre propiedades fisicoquímicas, compuestos bioactivos y atributos de calidad durante la producción de botanas de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en rodajas.

### B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el análisis proximal (contenido de humedad, proteína, grasa, cenizas, fibra cruda y carbohidratos) del camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en fresco.

2. Llevar a cabo una caracterización fisicoquímica (actividad de agua, fracturabilidad, color, pH, acidez titulable y sólidos solubles totales) y de compuestos bioactivos (ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales) en rodajas de camote fresco.

3. Contrastar los parámetros fisicoquímicos (actividad de agua, fracturabilidad,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  y diferencia total de color) y los compuestos bioactivos (ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales) de las botanas de rodajas de camote horneadas a las diferentes temperaturas (100, 120 y 140 °C) respecto al fresco.

4. Construir cinéticas de la razón de contenido de humedad, actividad de agua, fracturabilidad, diferencia total de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales durante el proceso de horneado de rodajas de camote de 1.5 mm de espesor a 100, 120 y 140 °C, cada 4 min hasta el tiempo final de horneado correspondiente con una velocidad de aire de 0.5 m/s.

5. Llevar a cabo un análisis microestructural (microscopía electrónica de barrido y espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier) de las rodajas de camote fresco y horneado.

6. Evaluar el contenido de humedad inicial, crítico y en equilibrio, semiespesor, densidad de flujo de masa, coeficiente de transferencia de masa y difusividad efectiva de rodajas de camote durante el proceso de horneado a diferentes temperaturas (100, 120 y 140 °C).

7. Analizar la difusividad efectiva, el contenido de humedad promedio y la fracturabilidad en el periodo de velocidad decreciente al utilizar la distribución de probabilidad de Weibull.

## **VI MATERIALES Y MÉTODOS**

### **A MATERIALES**

#### **1 Materia prima**

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó camote anaranjado (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) variedad Beauregard como materia prima, el cual se adquirió en un mercado local de la ciudad de Culiacán. Los lotes fueron seleccionados con relación a un estado de madurez comercial, se tomó en cuenta el criterio de homogeneidad de color, forma y tamaño; se supervisó que estuvieran libres de daños mecánicos y fitosanitarios visibles. La materia prima se lavó con una solución de NaClO a 100 ppm y se almacenó hasta su posterior utilización.

### **B MÉTODOS**

#### **1 Análisis proximal**

##### **a Contenido de humedad**

Se determinó el contenido de humedad al utilizar el método termogravimétrico descrito por la AOAC (2012). Este se basa en someter la muestra a desecación en una estufa de aire forzado hasta obtener masa constante. Mediante la cuantificación de la pérdida de masa, se determina el contenido de humedad en la muestra. Se colocan cápsulas de porcelana en un horno de convección (redLINE, RF-115, Alemania) por 3 h a 105 °C para conseguir masa constante. Se miden 1.5 g de muestra fresca ( $m_m$ ) junto con la cápsula de porcelana mediante una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), posteriormente, la muestra se seca en la estufa durante 24 h a 105 °C. Una vez pasado el tiempo de secado por convección, se

enfria a temperatura ambiente por 40 min en un desecador. Después, se determina la masa de la muestra seca ( $m_{s.s.}$ ) y se calcula el contenido de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{m_m - m_{s.s.}}{m_{s.s.}} (100) \quad (13)$$

donde  $m_m$  es la masa de la muestra (g) y  $m_{s.s.}$  es la masa de la muestra seca (g<sub>s.s.</sub>).

### **b Proteína**

La determinación de proteína se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por la AOAC (2012) con algunas modificaciones. Se miden 0.2 g de muestra y 1.625 g de catalizador (mezcla de  $K_2SO_4$  con  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ), los cuales se colocan en el fondo de un matraz Kjeldahl, asegurándose que no se adhiera a las paredes. A dicho matraz se le adicionan 5 mL de  $H_2SO_4$  y se deposita en un equipo digestor Kjeldahl (Labconco, 2123200, EUA). El amoniaco resultante se recibe en una solución de ácido bórico al 4 %, se utiliza rojo de metilo como indicador. Posteriormente, se lleva a cabo una titulación con HCl 0.1 N hasta obtener el cambio de color. Los resultados obtenidos se reportan como porcentaje de proteína, se utiliza 6.25 como factor de correlación. Los cálculos se realizan con la siguiente ecuación:

$$\text{Proteina (\%)} = \frac{(N)(V_{HCl})(0.014)(C_f)}{m_m} 100 \quad (14)$$

donde  $N$  es la normalidad del ácido clorhídrico (N),  $V_{HCl}$  es el volumen de ácido clorhídrico gastado (mL),  $C_f$  es el factor de conversión de nitrógeno a proteína y  $m_m$  es la masa de la muestra (g).

### **c Grasas**

Este análisis se llevó a cabo según la metodología de la AOAC (2012). Se utiliza el método de extracción por solvente por medio del cual las grasas se extraen de la muestra seca y molida, en un equipo Soxhlet. Se mide 1.5 g de muestra en un papel filtro (Whatman No. 4), éste se dobla e introduce en un dedal de celulosa. Estos dedales se colocan en vasos de aluminio cromado, previamente tarados, a los que se adiciona 50 mL de hexano caliente (60 °C). Los vasos de aluminio se instalan en el equipo de extracción, que extrae la grasa de las muestras, después se procede a evaporar el disolvente. El residuo en el recipiente de aluminio se coloca en una estufa (Felisa, FE-292D, 0511109) por 1 h a 121 °C. Enseguida, se ambienta en un desecador por 30 min y se registra su masa. Los cálculos se realizan con la siguiente ecuación:

$$\text{Grasas (\%)} = \frac{m_{cg} - m_c}{m_{s.s.}} (100) \quad (15)$$

donde  $m_{rg}$  es la masa del contenedor con el residuo de grasa (g),  $m_c$  es la masa del contenedor (g) y  $m_{s.s.}$  es la masa de la muestra seca (g<sub>s.s.</sub>).

### **d Cenizas**

Se siguió la metodología reportada por la AOAC (2012). Para la determinación del contenido de ceniza se colocan los crisoles de porcelana en una mufla (Thermolyne, FB1415M, México) por 4 h a 550 °C. Enseguida, se ambientan durante 60 min en un desecador y se registra la masa ( $m_c$ ). Posteriormente, a cada crisol se le adicionan 2 g de muestra ( $m_m$ ), los crisoles con la muestra se colocan en la mufla por 5 h a 550 °C. Transcurrido este tiempo, la temperatura de la mufla se disminuye

a 100 °C, para posteriormente retirar los crisoles con muestra y colocarlos en el desecador en el que se mantienen por 60 min; finalizado esto, se registra su masa ( $m_{cc}$ ). Los cálculos se realizan con la siguiente ecuación:

$$\text{Ceniza (\%)} = \frac{m_{cc} - m_c}{m_m} (100) \quad (16)$$

dónde  $m_{cc}$  es la masa del crisol con cenizas (g),  $m_c$  es la masa del crisol (g) y  $m_m$  es la masa de la muestra (g).

### **e Fibra cruda**

La fibra cruda se define como el residuo remanente después de un tratamiento secuencial con ácido sulfúrico e hidróxido de potasio en caliente, seguido de una extracción en frío con acetona (Fiber Tec, 2010, EUA) (ISO 6865, 2000). Se mide 1.0 mg de muestra y 1.0 mg de Celite 545 y se colocan en los crisoles con 150 mL de ácido sulfúrico caliente. Posteriormente, se instalan en el equipo de extracción en caliente para la primera extracción, terminada ésta, se agregan 150 mL de hidróxido de potasio caliente y se procede a la segunda extracción. A continuación, los crisoles son trasladados a la unidad de extracción en frío y se realizan tres extracciones con 25 mL de acetona cada una. Los crisoles se colocan en una estufa a 105 °C durante 5 h, se dejan enfriar en un desecador durante 30 min y se mide su masa. Después, se lleva a 525 °C en una mufla durante 3 h, se dejan enfriar a temperatura ambiente en el desecador y se registra la masa. Los cálculos se realizan con la siguiente ecuación:

$$\text{Fibra Cruda (\%)} = \frac{m_{ce} - (m_{cc} - m_{ref})}{m_s} 100 \quad (17)$$



donde  $m_{ce}$  es la masa del contenedor con residuo del extracto (g),  $m_{cc}$  es la masa del contenedor con residuo de ceniza (g) y  $m_{ref}$  es la masa del control (g).

## **f Carbohidratos**

Los carbohidratos se calcularon por diferencia de los demás componentes del análisis proximal (humedad, grasas, proteína, ceniza y fibra cruda) sobre una base de cálculo de 100, esto se lleva a cabo al considerar en base húmeda todos los resultados obtenidos para posteriormente poder realizar la diferencia (Alam y col 2016). Los resultados se reportan como porcentaje en base seca, excepto para humedad.

## **2 Preparación de la muestra**

Los camotes fueron cortados en rodajas con una rebanadora comercial (TORREY, RB-250, México). Se utilizó un micrómetro digital (Incize, CD-8" C, China) y un vernier digital (Truper, VE-DIG, México) para asegurar que cada rodaja posea espesor y diámetro constantes de 1.5 y 50 mm, respectivamente. Posteriormente, las rodajas se escaldaron en agua a 90 °C durante 2 min para promover un proceso de horneado uniforme.

## **3 Horneado**

Las rodajas de camote fueron horneadas en un horno eléctrico convectivo comercial (Oster, 6081-013, México) a 100, 120 y 140 °C durante 46, 32 y 24 min, respectivamente. Estas condiciones fueron seleccionadas de estudios preliminares.

## **4 Parámetros fisicoquímicos**

### **a Actividad de agua**

La actividad de agua se determinó por higrometría, basada en que esta variable ( $a_w$ ), es la presión de equilibrio del agua del sistema (camote) a temperatura constante, dividida por la presión de agua pura, a la misma temperatura constante, para ello se siguió la metodología descrita por Puma-Isuiza y col (2018), en la cual, se coloca la muestra, rodajas de camote frescas u horneadas molidas, según sea el caso, en el fondo de una charola plástica especial de un equipo higrómetro Aqualab (Decagon Devices Inc, CX-2 Pullman, EUA) hasta recubrirla por completo, dicha charola es introducida en el equipo y se determina la actividad de agua de la muestra que se esté analizando en base al punto de rocío, estas determinaciones se realizaron a temperatura ambiente (25 °C), utilizando agua destilada como blanco.

### **b Fracturabilidad**

La determinación de la fuerza de fractura para las rodajas de camote frescas y horneadas se llevó a cabo al seguir la metodología descrita por Salazar y col (2014) y Janve y col (2015). Las muestras se analizan en una maquina universal de ensayo (Instron, 3342, EUA) equipada con una celda de carga de 500 N y se registra la fuerza de carga máxima (N) para agrietar las muestras. La prueba se lleva a cabo al utilizar una sonda de acero inoxidable de 8 mm de diámetro con un extremo cilíndrico plano y un accesorio de plataforma con una base cilíndrica hueca que tiene un diámetro externo de 33.5 mm y un diámetro interno de 16 mm. La velocidad de prueba es de 1.0 mm/s, con una distancia de recorrido de 5 mm. Se utiliza el

software Bluehill Lite (versión 2.23) para analizar los datos y los resultados se expresan como la fuerza máxima de fractura (N).

### **c Color y diferencia total de color**

La evaluación de color se expresa en coordenadas HunterLab, se registraron las variables  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  en la superficie de las rodajas de camote mediante un colorímetro (Minolta, CR-300, Japón); se realizan cinco disparos a cada una de las muestras (Yam y Papadakis 2004). La calibración se lleva a cabo al realizar tres disparos en el mosaico control de color blanco, el equipo registra los parámetros predefinidos de  $L^* = 97.38$ ,  $a^* = 0.17$  y  $b^* = 1.94$ . Para la determinación de la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) se miden las variables  $L_f^*$ ,  $a_f^*$  y  $b_f^*$  de color en diferentes zonas de las muestras frescas como control, así como en las muestras horneadas ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ). Los cálculos de  $\Delta E$  se realizan a partir de la siguiente ecuación (Islam y col 2018):

$$\Delta E = \left[ (L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

donde  $\Delta E$  es la diferencia total de color de las botanas de camote horneadas,  $L_f^*$ ,  $a_f^*$  y  $b_f^*$  son las variables de color de las rodajas de camote fresco y  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son las variables de color de las rodajas de camote horneadas.

### **d pH**

El pH se determinó de acuerdo con el método descrito por la AOAC (2012), se homogeneizan 10 g de camote con 50 mL de agua destilada y neutra, se afora a 100 mL, se filtra la mezcla y la medición se lleva a cabo mediante la inmersión directa del electrodo de vidrio de un potenciómetro (Hanna instruments, HI 2211,

EUA), previamente calibrado con buffer a pH 4 y 7, en un vaso de precipitado con la mezcla.

### **e Acidez titulable**

La acidez titulable se determinó de acuerdo con la AOAC (2012); del homogeneizado para la medición de pH se toma una alícuota de 20 mL y se titula con NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de  $8.1 \pm 0.2$  (punto de vire de la fenolftaleína). Se reporta como porcentaje de ácido cítrico:

$$AT = \frac{[(V_g)(MEqA)(N)(V_T)]}{[(m_m)(V_A)]}(100) \quad (19)$$

donde  $AT$  es la acidez titulable (% ácido cítrico),  $V_g$  es el volumen de NaOH gastado (mL),  $MEqA$  es el miliequivalente del ácido cítrico,  $N$  es la normalidad del NaOH (N),  $V_T$  es el volumen total de disolución (mL),  $m_m$  es la masa de la muestra (g) y  $V_A$  es el volumen de la alícuota (mL).

### **f Sólidos solubles totales**

El contenido de sólidos solubles totales ( $SST$ ) se obtuvo de acuerdo con la metodología reportada por la AOAC (2012); se coloca la muestra en un refractómetro tipo Abbe (Sper Scientific, 300001, China). Los resultados se reportan como porcentaje de azúcar ( $^{\circ}$ Brix).

## **5 Compuestos bioactivos**

### **a Ácido ascórbico**

El contenido de ácido ascórbico (vitamina C) se determinó mediante un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation, GENESYS 10uv, EUA) al emplear

la metodología descrita por Iribe-Salazar y col (2015), cuyo principio se basa en la reacción del ácido ascórbico con el 2,6 diclorofenolindofenol (DCPI), en donde el ácido ascórbico reduce al DCPI que absorbe a 520 nm. Primeramente, se elabora una curva de calibración al graficar la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con el ácido ascórbico contra diferentes concentraciones de solución estándar. A partir de una solución de reserva de ácido ascórbico (1000 ppm) se preparan estándares a diferentes concentraciones (1, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm). Posteriormente, se procede a la construcción de la curva, se obtiene una lectura de absorbancia L1 para el DCPI total al mezclar 1 mL de ácido oxálico (4 % p/v) + 1 mL de buffer de acetato de sodio + 8 mL de solución DCPI, se usa agua desionizada para calibrar a cero, además de otra lectura de absorbancia L2 para el DCPI residual, la que se consigue al calibrar a cero con una mezcla de 1 mL de solución estándar (1-50 ppm) + 1 mL de solución buffer de acetato de sodio + 8 mL de agua desionizada y medir la absorbancia de los estándares al añadirles 1 mL de solución buffer de acetato de sodio + 8 mL de DCPI. Se evalúa una sola absorbancia L1, mientras la absorbancia L2 se obtiene para cada estándar. La absorbancia debida a la reacción se calcula con la diferencia entre la absorbancia (L1) para el DCPI total y la absorbancia (L2) para el DCPI residual después de la reacción con el ácido ascórbico. La diferencia L1–L2 representa la absorbancia correspondiente a la reacción. El extracto se produce al agregar 0.5 g de muestra a 15 mL de ácido oxálico, se homogeneiza en un Ultra-Turrax (IKA, T18 basic SI, Alemania) durante 1 min y se filtra a través de cuatro capas de tela de organza. Para la determinación de ácido ascórbico en los extractos se obtiene la lectura de absorbancia L2 para el DCPI residual al mezclar 1 mL de extracto de camote + 1 mL de buffer de acetato

de sodio + 8 mL de DCPI. Para calibrar a cero se utiliza una mezcla de 1 mL de extracto de camote + 1 mL de buffer de acetato de sodio + 8 mL de agua desionizada. La diferencia L1–L2 representa la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con ácido ascórbico; al sustituir esta diferencia de absorbancia en la ecuación de la recta correspondiente a la curva de calibración (gráfico L1–L2 contra concentración de ácido ascórbico) se obtiene la concentración de ácido ascórbico presente en la muestra, la cual se expresa como mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>.

### **b Compuestos fenólicos**

Los compuestos fenólicos se determinaron espectrofotométricamente a 760 nm mediante el método descrito por Moo-Huchin y col (2014) en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation, GENESYS 10uv, EUA). Se elabora una curva de calibración, mediante una solución de reserva de ácido gálico (1000 ppm) y se preparan estándares de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 ppm que se miden con la metodología descrita a continuación: Los extractos se obtienen al agregar 10 mL de etanol al 80 % a 1 g de camote, posteriormente se coloca en un mezclador serológico de vaivén (UNICO, TTR-200, EUA) por 10 min a temperatura ambiente y se centrifuga a 4000xg por 10 min a 10 °C. Se recupera el sobrenadante y se repite el proceso para una segunda, tercera y cuarta extracción. El sobrenadante resultante de las posteriores extracciones se mezcla con el de la primera extracción, para obtener un total de 40 mL aproximadamente y se evapora a 60 °C en un rotaevaporador, el residuo se disuelve en 2 mL de etanol (extracto). La determinación de los estándares y de compuestos fenólicos en el extracto se realiza al agregar 125 µL del estándar o extracto, 125 µL de reactivo de Folin y 0.5 mL de

agua destilada, se agita durante 1 min en vórtex, se deja reposar 6 min, posteriormente, se adicionan 1250  $\mu\text{L}$  de carbonato de sodio al 7 % y 1 mL de agua destilada, se agita durante 30 s y se mantiene en reposo durante 90 min en oscuridad; por último, la absorbancia se registra a 760 nm al ajustar el espectrofotómetro con el blanco con la sustitución del extracto por agua destilada. Los resultados se expresan como  $\text{mg}_{\text{EAG}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$ .

### **c Carotenoides totales**

La determinación de carotenoides totales se llevó a cabo de acuerdo con la metodología reportada por Barba y col (2006). Primeramente, se miden 0.5 g de extracto y se mezcla con 20 mL de una solución de hexano:acetona:etanol (50:25:25 v/v/v) y se mantiene en agitación constante durante 30 min. Posteriormente, se adicionan 3 mL de agua y se deja reposar hasta la separación de fases, se centrifuga durante 10 min a  $4000\times\text{g}$  y se recupera la fase orgánica. El proceso de extracción se repite 3 veces y se mezclan las fases recuperadas. La absorbancia se determina espectrofotométricamente a 446 nm. El contenido de carotenoides totales se calcula de acuerdo con la ley de Lamber-Beer con la siguiente ecuación:

$$\text{Carotenoides totales} = \frac{(Abs)(\hat{V}_{extrc})}{(\epsilon_m)(l)} \quad (20)$$

donde  $Abs$  es la absorbancia a 446 nm,  $\hat{V}_{extrc}$  es el volumen específico de extracción (volumen recuperado de la fase orgánica en dL/masa de la muestra en g) (dL/g),  $\epsilon_m$  es el coeficiente de extinción másico del  $\beta$ -caroteno en hexano (2500 dL/g cm) y  $l$

es el paso óptico de la celda (1 cm). Los resultados se reportan como  $\text{mg}_{\text{EBC}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$ .

## **6 Cinéticas de horneado**

Se realizaron cinéticas de horneado para la razón del contenido de humedad, actividad de agua, fracturabilidad, diferencia total de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales. Para ello, dichas variables se determinaron cada 4 min hasta el tiempo final de horneado correspondiente a 100, 120 y 140 °C, siguiendo las metodologías descritas anteriormente.

## **7 Almidón**

Las botanas de rodajas de camote horneadas fueron trituradas a un tamaño de partícula menor a 420  $\mu\text{m}$  para realizar las siguientes determinaciones.

### **a Análisis microestructural**

#### **1) Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

Las muestras se examinaron de acuerdo con lo reportado por Basilio-Cortés y col (2019) con un microscopio electrónico de barrido (JEOL, JSM-IT300, Japón) equipado con un detector de rayos X Oxford y un filamento de tungsteno. Las muestras de botanas de camote horneadas fueron congeladas con nitrógeno líquido, liofilizadas y almacenadas a  $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los análisis se realizan bajo condiciones de vacío a un voltaje de aceleración de 20 kV. Las muestras se colocan en un portaobjetos de aluminio con cinta de carbón conductora de doble cara y se cubren mediante pulverización catódica con aproximadamente 10 nm de oro. Se capturaron imágenes para visualizar los espacios vacíos que se encuentran en las



muestras de botanas de camote horneadas a diferentes condiciones de temperatura y tiempo. Las microfotografías fueron capturadas en la zona longitudinal y transversal de rodajas de camote con una resolución de 100X.

## **2) Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier se empleó para detectar los grupos funcionales e interacciones de enlace. Los espectros de las muestras se obtuvieron al utilizar un espectrofotómetro FTIR (Perkin Elmer, Frontier, EUA). Los espectros se registraron en el intervalo de número de onda ( $1/\lambda$ ) de 4000 a  $400\text{ cm}^{-1}$  ( $2.5$  a  $25\text{ }\mu\text{m}$ ) a una velocidad de barrido de  $0.1\text{ cm s}^{-1}$  y una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  en el programa Expectrum 10.11. El equipo se utilizó en modo de transmitancia y los gráficos de transmitancia contra número de onda fueron analizados con el programa Origin 2018 (Fitch-Vargas 2019).

## **8 Parámetros de difusión**

### **a Contenido de humedad inicial**

El contenido de humedad inicial se obtuvo mediante el método propuesto por la AOAC (2012) basado en termogravimetría como se explicó anteriormente.

### **b Contenido de humedad crítico**

El contenido de humedad crítico de las rodajas de camote horneadas a  $100$ ,  $120$  y  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  se determinó estadísticamente, con la consideración de que las cinéticas de horneado presentan un comportamiento cuadrático, para dicho calculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$X = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (21)$$

Se llevó a cabo un análisis por medio de regresión lineal múltiple, para determinar el estimador del término cuadrático ( $\beta_2$ ). El contenido de humedad crítico se estableció como el último contenido de humedad considerado para cumplir la condición de que el estimador cuadrático dejó de ser significativo ( $X = \beta_0 + \beta_1 t$ ) en la regresión lineal ( $p > 0.05$ ). Así, en el periodo de velocidad constante, la cinética del contenido de humedad es una recta (Sáez-Ceniceros 2019).

### **c Contenido de humedad en el equilibrio**

El contenido de humedad en el equilibrio se determinó cuando no se observó cambio en el contenido de agua promedio (Pacheco-Plata 2024) es decir, cuando se manifiesta que la masa de la muestra no se modifica.

### **d Semiespesor**

El espesor ( $2L$ ) de la muestra se midió con un micrómetro digital (Inzice, CD-8 "C, México) y a partir de él se obtuvo el semiespesor ( $L$ ) (Iribe-Salazar y col 2018).

### **e Densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y coeficiente de transferencia de masa ( $k_Y$ )**

La densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y el coeficiente de transferencia de masa ( $k_Y$ ) se determinaron de acuerdo con lo reportado por Sáez-Ceniceros (2019). La  $N_c$  se calculó con la siguiente ecuación:

$$N_c = \left( \frac{m_{s.s.}}{A} \right) \left( - \frac{dX}{dt} \right) \quad (22)$$

donde  $m_{s.s.}$  es la masa de sólidos secos ( $\text{kg}_{s.s.}$ ),  $A$  es el área superficial expuesta al horneado ( $\text{m}^2$ ) y  $dX/dt$  es el gradiente del contenido de humedad ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{s.s.}$ ).

Una vez determinada la densidad de flujo de masa, se calculó el coeficiente de transferencia de masa con la siguiente ecuación:

$$k_Y = \frac{N_c}{Y_s - Y} \quad (23)$$

donde  $Y_s$  es la humedad de saturación del aire en la superficie líquida ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{a.s.}}$ ) y  $Y$  es la humedad del aire ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{a.s.}}$ ).

## **f Difusividad efectiva constante**

### **1) Método de pendientes por subperiodos**

Se consideró solo un término de la serie infinita descrita en la ecuación (12) para el contenido de agua promedio, la ecuación se linealiza y la difusividad efectiva se estima a partir de la pendiente del gráfico de  $\ln[(\bar{X} - X_\infty)/(X_0 - X_\infty)]$  contra el tiempo. Debido a que el gráfico no resultó una recta, se consideraron varios periodos de velocidad decreciente, en el que cada uno se caracteriza por una difusividad efectiva constante. Este método solo resulta válido si el número de Fourier de transferencia de masa,  $F_0 = D_e t / L^2$  es mayor a 0.2 con un error del 2 % en la Fracción de Humedad No Alcanzada (FHNA), ya que no se consideran los términos subsecuentes de la serie infinita (Iribe-Salazar y col 2018).

### **2) Método de aproximaciones sucesivas**

Se resolvió el número de Fourier de transferencia de masa,  $F_0$ , para cada tiempo a partir de la ecuación (12) con el método iterativo de Newton de segundo orden, al considerar 30 términos de la serie infinita. Después de conocer el número de Fourier de transferencia de masa, para cada tiempo, se obtiene el coeficiente de difusividad

efectiva. También, se probó un coeficiente de difusividad constante al calcular el promedio de estas difusividades (Iribe-Salazar y col 2018).

## **g Difusividad efectiva variable**

### **1) Función del tiempo al cuadrado**

La difusividad efectiva se calculó considerando que el coeficiente de difusión puede aumentar durante el horneado debido a la estructura de los alimentos, al número y el tamaño de poros. Este cambio en el coeficiente de difusión puede ser expresado mediante la segunda ley de Fick para difusión en una dirección, al considerar la difusividad efectiva en función del tiempo al cuadrado (Iribe-Salazar y col 2018).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (D_0 + D_1 t + D_2 t^2) \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (24)$$

La ecuación anterior se resuelve con el método de separación de variables al definir  $dT$  como:

$$dT = (D_0 + D_1 t + D_2 t^2) dt \quad (25)$$

La segunda ley de Fick junto con su condición inicial y dos de frontera se normalizan al emplear la Fracción de Humedad No Alcanzada (*FHNA*),  $\psi = (X - X_\infty)/(X_c - X_\infty)$ , la coordenada espacial adimensional  $\xi = x/L$  y el tiempo adimensional  $\tau = T/L^2$ , para obtener las siguientes ecuaciones adimensionales:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
\psi(\xi, 0) &= 1 \\
\psi(-1, \tau) &= 0 \\
\psi(1, \tau) &= 0
\end{aligned} \tag{27}$$

Mediante el método de separación de variables se obtiene la siguiente solución:

$$\psi = (A \cos \lambda \xi + B \sin \lambda \xi) \exp^{-\lambda^2 \tau} \tag{28}$$

Al aplicar las condiciones de frontera de la ecuación (27),  $B = 0$  y la ecuación anterior se satisface cuando:

$$\lambda_n = (2n-1) \frac{\pi}{2} \text{ para } n = 1, 2, 3 \dots \tag{29}$$

La ley de difusión de Fick es una ecuación diferencial parcial lineal, por lo que al utilizar el principio de superposición se obtiene una solución general:

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \lambda_n \xi \exp^{-\lambda_n^2 \tau} \tag{30}$$

Al considerar la condición inicial, los coeficientes  $A_n$  se evalúan de forma similar a los coeficientes de Fourier, al multiplicar a ambos miembros por  $\cos \lambda_m \xi$  e integrar:

$$\int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi d\xi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi \cos \lambda_n \xi d\xi \tag{31}$$

Al emplear la ecuación (29), y debido a la ortonormalidad, el único término distinto de cero en el segundo miembro de la ecuación (31) se obtiene cuando  $m = n$ , por lo tanto:

$$\psi = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)} \cos(2n-1) \frac{\pi}{2} \xi \exp \left[ -\frac{\pi^2 (2n-1)^2}{4} \tau \right] \tag{32}$$

Al integrar la ecuación (25) se obtiene:

$$T = \left( D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \right) t \quad (33)$$

En términos de las variables originales, el contenido de humedad, en función de la dimensión espacial y el tiempo, se obtiene para una difusividad variable en función del tiempo al cuadrado.

$$\frac{X - X_\infty}{X_c - X_\infty} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \exp \left[ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2 \left( D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \right) t}{4L^2} \right] \quad (34)$$

El contenido de humedad promedio adimensional  $\bar{\psi} = \int_{-1}^1 \psi d\xi / \int_{-1}^1 d\xi$  resulta:

$$\bar{\psi} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2 \tau}{4} \right] \quad (35)$$

Al escribir la ecuación en términos de las variables originales, se obtiene una solución analítica para el contenido de humedad promedio en función del tiempo al considerar una difusividad variable.

$$\frac{\bar{X} - X_\infty}{X_c - X_\infty} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2 \left( D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \right) t}{4L^2} \right] \quad (36)$$

De la ecuación (36), el tiempo adimensional  $\tau = T/L^2$  se expresa como:

$$\tau = \frac{\left( D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \right) t}{L^2} \quad (37)$$

$\tau$  se resuelve a partir de la ecuación (36) para cada tiempo a partir del método de Newton de segundo orden, al emplear 30 términos en la serie infinita. Al conocer el tiempo adimensional, la ecuación (37) se reorganiza como:

$$\frac{\tau L^2}{t} = D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \quad (38)$$

donde los parámetros  $D_0$ ,  $D_1$  y  $D_2$  se estiman mediante regresión lineal.

### **9 Distribución de Weibull para modelado de difusividad efectiva, contenido de humedad y fracturabilidad**

Para el modelado con la distribución de Weibull se siguió la metodología reportada por Iribe-Salazar y col (2018). En el cálculo de la difusividad se considera que está en relación con el desplazamiento cuadrático medio  $(\Delta x)^2$  del movimiento al azar de una partícula y la función de densidad  $\Phi(\Delta x, t) = \Phi_\infty(\Delta x) f(t)$  de los desplazamientos en función del tiempo:

$$D = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \lambda \rightarrow 0}} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\Delta x)^2}{2\lambda} \Phi_\infty(\Delta x) f(t) d(\Delta x) dt \quad (39)$$

La función de densidad de probabilidad  $f(t)$  describe el fenómeno de dilatación de los poros y la función de densidad  $\Phi_\infty(\Delta x)$  captura la estructura del medio poroso, tal como la distribución del tamaño y el número de poros, así como la tortuosidad cuando se ha alcanzado la máxima expansión de los poros.

La siguiente función de densidad  $f(t)$  permite obtener la distribución de probabilidad  $F(t)$  con la propiedad de que cuando el tiempo tiende a infinito, la distribución es 1.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (40)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$$

La difusividad se puede expresar como  $D = D_\infty F(t)$  y la difusividad normalizada como:

$$\theta_D = \frac{D - D_0}{D_\infty - D_0} \quad (41)$$

Esto permite que la fracción de difusividad no alcanzada (*FDNA*) se pueda escribir en términos de la distribución  $F(t)$ .

$$FDNA = 1 - \theta_D = \frac{D - D_\infty}{D_0 - D_\infty} = \frac{F(t) - 1}{F(t_0) - 1} \quad (42)$$

Para la distribución  $F(t)$ , se propone la función de distribución de Weibull, ya que ha sido ampliamente aplicada a la distribución de partículas y de burbujas, además, su estructura matemática es similar a la de la distribución de poros en alimentos, donde  $\alpha$  es el parámetro de forma y  $\beta$  el parámetro de escala de tiempo.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (43)$$

Al sustituir esta función en la difusividad normalizada  $\theta_D$  y considerar el tiempo inicial mucho menor al tiempo de proceso, se obtiene:

$$\theta_D = \frac{D - D_0}{D_\infty - D_0} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (44)$$

Así, la difusividad se calcula en función del tiempo con la siguiente ecuación:



$$D = D_{\infty} + (D_0 - D_{\infty}) e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (45)$$

Al considerar las ecuaciones para placa infinita y transferencia por ambas caras, se integra la variable  $T$  y se sustituye en la solución para obtener el contenido de humedad promedio en función del tiempo para difusividad variable al utilizar la distribución de Weibull, donde los parámetros  $D_0$ ,  $D_{\infty}$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  se obtuvieron con regresión no lineal.

$$FCNA = \frac{\bar{X} - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\left\{ \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4L^2} \left[ D_0 + (D_{\infty} - D_0) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k!(k\alpha+1)} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{k\alpha} \right] t \right\}} \quad (46)$$

Para la fuerza de fractura se propuso una fracturabilidad normalizada:

$$\theta_F = \frac{F - F_0}{F_{\infty} - F_0} \quad (47)$$

La cual se considera que tiene relación con la difusividad normalizada  $\theta_D$ , debido a que la variabilidad de este parámetro es resultado de los cambios estructurales de los alimentos. Sin embargo, la difusividad normalizada  $\theta_D$  depende del tamaño de poro más que del número de poros, por lo tanto, se incorpora esta dependencia al utilizar una función de distribución del número de poros  $\theta_N$ , la cual se propone como una combinación lineal de la distribución de Weibull ( $\theta_m$ ) y su derivada:

$$\theta_N = \theta_m + Ab\theta_m' \quad (48)$$

donde  $\theta_N$  es la distribución del número de poros,  $A$  es un parámetro de combinación lineal y  $\theta_m$  es la distribución del número de poros no colapsables:

$$\theta_m = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^a} \quad (49)$$

Los parámetros de forma y escala para la fracturabilidad son  $a$  y  $b$ , respectivamente. El factor de escala por la derivada  $\theta'_m$  de la distribución de Weibull es:

$$b\theta'_m = a \left(\frac{t}{b}\right)^{a-1} e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^a} \quad (50)$$

donde  $b\theta'_m$  representa la distribución del número de poros colapsables. Así, la fracturabilidad normalizada  $\theta_F$  puede ser modelada como un producto de ambos efectos:

$$\theta_F = \theta_D \theta_N \quad (51)$$

Al llevar a cabo la sustitución se tiene la siguiente ecuación para modelar la fuerza de fractura en función del tiempo con distribución de Weibull.

$$\frac{F - F_0}{F_\infty - F_0} = \theta_F = \theta_D (\theta_m + Ab\theta'_m) \quad (52)$$

## 10 Métodos estadísticos

### a Análisis proximal, parámetros fisicoquímicos y compuestos bioactivos

Se llevó a cabo un análisis mediante estadística descriptiva para las siguientes variables: contenido de humedad, proteína, grasas, cenizas, fibra cruda, carbohidratos, actividad de agua, fracturabilidad,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides

totales. Se realizaron 3 réplicas de cada variable y se reporta la media y desviación estándar (Montgomery y Jaime 1991).

### **b Contraste del camote horneado respecto al fresco**

Para la comparación se emplearon dos diseños completamente al azar, el primero con el factor temperatura (100, 120 y 140 °C) y el segundo con cuatro niveles tomando en cuenta un control (fresco, 100, 120 y 140 °C). Las variables de respuesta fueron: actividad de agua, fracturabilidad, parámetros de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales. Se llevaron a cabo 3 réplicas. La comparación de medias de las variables de respuesta se realizó con la prueba de Fisher (*LSD*) en el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI y con la prueba de Dunnett (*D*) al utilizar el fresco como control en el software Minitab, ambos con  $\alpha = 0.05$  (Pellegrini-Zurita 2017).

### **c Cinéticas de variables de calidad**

Las cinéticas de la razón de contenido de humedad ( $n = 3$ ), actividad de agua ( $n = 3$ ), fracturabilidad ( $n = 9$ ), diferencia total de color ( $n = 9$ ), ácido ascórbico ( $n = 3$ ), compuestos fenólicos ( $n = 3$ ) y carotenoides totales ( $n = 3$ ) se analizaron mediante una comparación de medias con la prueba de Fisher (*LSD*,  $\alpha = 0.05$ ).

### **d Parámetros de difusión**

Se realizó un análisis de varianza completamente al azar con el factor temperatura (100, 120 y 140 °C) para el contenido de humedad inicial, crítico y en el equilibrio, la densidad de flujo de masa y el coeficiente de transferencia de masa.

Se llevaron a cabo 3 réplicas de cada respuesta y las medias fueron comparadas con la prueba de Fisher (*LSD*,  $\alpha = 0.05$ ).

## VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición proximal, fisicoquímica y de compuestos bioactivos de camote fresco permitió conocer las características de la materia prima con la cual se obtuvo las botanas de camote a las diferentes temperaturas (100, 120 y 140 °C). Así como el análisis de los parámetros fisicoquímicos y de los compuestos bioactivos de las botanas de camote horneadas permite que se pueda llevar a cabo el contraste de las botanas con el camote fresco y conocer las características de las botanas obtenidas, la severidad del proceso de horneado sobre las botanas, así como su contenido nutrimental al estudiar las retenciones de los compuestos bioactivos. Comprender la cinética de las variables de calidad permite comprender los cambios que ocurren en los alimentos durante el proceso de horneado. Este conocimiento permite desarrollar procesos de horneado más eficientes y controlados para producir botanas de camote más saludables y con características que armonicen con las preferencias de los consumidores. La obtención de las microfotografías hizo posible observar físicamente los cambios en las rodajas de camote atribuidos a la porosidad, lo que combinado con el estudio de los parámetros de difusión facilita la comprensión de la transferencia de masa durante el horneado de las rodajas de camote (100, 120 y 140 °C). Esto permitió explicar con fundamentos físicos y matemáticos lo que está sucediendo con la movilidad del agua dentro de las botanas y comprobar la teoría del comportamiento en el incremento del tamaño y número de poros durante el horneado.

## A RODAJAS DE CAMOTE FRESCAS

### 1 Análisis proximal

Los resultados obtenidos en el análisis proximal de camote fresco se muestran en el **Cuadro 3**. Las variaciones encontradas en la composición proximal, comparadas con otros autores, puede atribuirse al estado de madurez, la variedad de los camotes, las condiciones de crecimiento, el lugar y el tiempo de cosecha, ya que dichos factores pueden afectar la composición (Neela y Fanta 2019; Waidyarathna y col 2021).

El contenido de humedad de las rodajas de camote fresco fue  $78.4 \pm 0.17$  %, cercano a lo reportado por Alam y col (2016), Dako y col (2016), Vidal y col (2018) y Waidyarathna y col (2021) de 73.0, 77.0, 74.0 y 77.2 %, respectivamente. El análisis mostró un contenido de proteínas de  $2.82 \pm 0.07$  %, menor al 3.69 y 3.00 % encontrado por Rodríguez y col (2018) y Waidyarathna y col (2021), respectivamente. El porcentaje de grasas determinado fue  $1.23 \pm 0.01$  %, mayor al 0.63 % reportado por Alam y col (2016) e inferior al 2.10 y 2.60 % encontrado por Vidal y col (2018) y Waidyarathna y col (2021), respectivamente. El contenido de ceniza hallado fue  $0.94 \pm 0.01$  %, menor que el 1.17 % reportado por Alam y col (2016). La fibra cruda fue  $3.81 \pm 0.07$  %, similar a los documentados por Rodríguez y col en 2018 (3.68 %) y Vidal y col en 2018 (3.50 %). Se encontró un contenido de carbohidratos de  $12.9 \pm 0.11$  %; Nicanuru y col (2015) y Vidal y col (2018), publicaron contenidos de carbohidratos de 18.30 y 20.20 %, respectivamente.

**Cuadro 3.** Composición proximal de camote fresco (cv. Beauregard).

<b>Variable</b>	<b>Contenido (%)</b>
<b>Contenido de humedad</b>	78.4 ± 0.17
<b>Proteína</b>	2.82 ± 0.07
<b>Grasas</b>	1.23 ± 0.01
<b>Ceniza</b>	0.94 ± 0.01
<b>Fibra cruda</b>	3.81 ± 0.07
<b>Carbohidratos</b>	12.9 ± 0.11

Los datos se presentan en base húmeda

## 2 Parámetros fisicoquímicos

Los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos de las rodajas de camote fresco se presentan en el **Cuadro 4**.

### a Actividad de agua ( $a_w$ )

La actividad de agua para camote fresco fue de  $0.995 \pm 0.001$ , la cual es similar a lo encontrado en la literatura (Junqueira y col 2016; Barbosa-Cánovas 2020; Monteiro y col 2020) de 0.988, 0.985 y 0.993, respectivamente.

### b Fracturabilidad ( $F$ )

La fuerza máxima de fractura en rodajas de camote fresco fue  $10.2 \pm 0.4$  N, la cual fue mayor que los 9.30 N encontrados por Chacón-Villalobos y Reyes-Cruz (2009), pero menor a los 11.4 N obtenidos por Monteiro y col (2020). Estas diferencias pueden atribuirse al diámetro de la sonda utilizada, al espesor de las muestras y a la variabilidad propia del proceso de medición.

### c Color ( $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ )

Las variables de color obtenidas en las rodajas de camote frescas fueron  $L^* = 70.5 \pm 0.43$ ,  $a^* = 16.3 \pm 0.39$  y  $b^* = 33.5 \pm 0.31$ , estas concuerdan con las reportadas por Aina y col (2009)  $L^* = 62.5$ ,  $a^* = 27.8$  y  $b^* = 28.5$ , Ruttarattanamongkol y col (2016)  $L^* = 74.2$ ,  $a^* = 27.9$  y  $b^* = 44.4$  y Tsai y col (2021)  $L^* = 67.5$ ,  $a^* = 5.50$  y  $b^* = 30.8$ , los cuales obtuvieron variables correspondientes a tonalidades anaranjadas, observándose las mayores diferencias en " $a^*$ ", lo que puede atribuirse a la variedad de camote.



**Cuadro 4.** Parámetros fisicoquímicos de rodajas de camote fresco.

<b>Variable</b>	<b>Fresco</b>
<b>Actividad de agua</b>	0.995 ± 0.001
<b>Fracturabilidad (N)</b>	10.2 ± 0.40
<b><i>L</i><sup>*</sup></b>	70.5 ± 0.43
<b><i>a</i><sup>*</sup></b>	16.3 ± 0.39
<b><i>b</i><sup>*</sup></b>	33.5 ± 0.31
<b>pH</b>	6.09 ± 0.02
<b>Acidez titulable (% ácido cítrico)</b>	0.11 ± 0.01
<b>Sólidos solubles totales (°Brix)</b>	15.9 ± 0.10

#### **d pH**

El pH del camote fue  $6.09 \pm 0.02$ , similar al pH de 6.00 encontrado por Caetano y col (2017), menor al 6.55 reportado por Neela y Fanta (2019) y superior al 5.49 que indicaron Ogliari y col (2020), estos autores mencionan que las variaciones de pH pueden deberse al lugar de cultivo y al estado de madurez.

#### **e Acidez titulable**

La acidez titulable del camote fresco resultó de  $0.11 \pm 0.01$  % ácido cítrico, misma que está dentro del rango de 0.10 a 0.20 % ácido cítrico reportado por Caetano y col (2017), Ogliari y col (2020) y Tsai y col (2021).

#### **f Sólidos solubles totales**

El contenido de sólidos solubles totales del camote fue  $15.9 \pm 0.1$  °Brix, el cual fue mayor a lo publicado por Mohd-Nawi y col en 2015 (9.90 °Brix), Caetano y col en 2017 (10.0 a 14.0 °Brix) y Oliveira y col en 2019 (7.10 a 13.2 °Brix), las diferencias en esta variable pueden atribuirse principalmente al estado de madurez y al contenido de agua del camote utilizado.

### **3 Compuestos bioactivos**

Los resultados obtenidos para los compuestos bioactivos de las rodajas de camote fresco se presentan en el **Cuadro 5**.

#### **a Ácido ascórbico**

El contenido de ácido ascórbico en camote fresco fue de  $84.9 \pm 2.6$  mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>, que se encuentra dentro del rango (65.1 – 115.5 mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>) reportado por

**Cuadro 5.** Compuestos bioactivos de rodajas de camote fresco.

<b>Variable</b>	<b>Fresco</b>
<b>Ácido ascórbico</b> (mg <sub>AA</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	84.9 ± 2.60
<b>Compuestos fenólicos</b> (mg <sub>EAG</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	301 ± 2.90
<b>Carotenoides totales</b> (mg <sub>EBC</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	24.1 ± 0.09

diversos autores (Lim 2016; Vidal y col 2018; Suárez y col 2020), las diferencias pueden atribuirse al manejo y cuidado durante la cosecha y la poscosecha, al método de medición empleado y la exposición a factores como el oxígeno y la luz.

### **b Compuestos fenólicos**

El contenido de compuestos fenólicos de las rodajas de camote fresco fue  $301 \pm 2.9 \text{ mg}_{\text{EAG}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$ , esto concuerda con lo reportado por Ooko-Abong y col (2020), Nakagawa y col (2021), Johnson y col (2022) y Pazos y col (2022), autores que obtuvieron contenidos de fenólicos de 152 a  $417 \text{ mg}_{\text{EAG}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$ . La variabilidad en los resultados puede estar relacionada con la variedad, el estado de madurez y los factores ambientales, así como el efecto generado por el proceso de corte de las rodajas (Dovene y col 2019; Ogliari y col 2020).

### **c Carotenoides totales**

El contenido de carotenoides totales en rodajas de camote fresco fue  $24.1 \pm 0.09 \text{ mg}_{\text{EBC}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$  el cual se encuentra en el intervalo de contenidos de carotenoides reportados por Vidal y col (2018), Alam y col (2020) y Kourouma y col (2020), cuyos resultados oscilaron entre de 21 a  $27 \text{ mg}_{\text{EBC}}/100 \text{ g}_{\text{s.s.}}$ . Las diferencias pueden estar asociadas a la variedad de camote, así como con el lugar, la temporada y otras condiciones de cultivo como el clima y el tipo de suelo.

## **B RODAJAS DE CAMOTE HORNEADAS**

### **1 Parámetros fisicoquímicos**

El contraste de los parámetros fisicoquímicos de las rodajas de camote horneado a 100, 120 y 140 °C respecto a las frescas se presenta en el **Cuadro 6**.

**Cuadro 6.** Contraste de parámetros fisicoquímicos entre rodajas de camote frescas y horneadas a diferentes temperaturas.

<b>Variable</b>	<b>Fresco</b>	<b>100 °C</b>	<b>120 °C</b>	<b>140 °C</b>	<b>LSD</b>	<b>D</b>
<b>Actividad de agua</b>	0.995	0.303 <sup>a*</sup>	0.258 <sup>b*</sup>	0.226 <sup>c*</sup>	0.002	0.002
<b>Fracturabilidad (N)</b>	10.2	5.62 <sup>a*</sup>	4.64 <sup>b*</sup>	4.10 <sup>c*</sup>	0.49	0.68
<b><i>L</i><sup>*</sup></b>	70.5	46.9 <sup>a*</sup>	46.4 <sup>a*</sup>	45.0 <sup>b*</sup>	1.07	1.10
<b><i>a</i><sup>*</sup></b>	16.3	11.6 <sup>a*</sup>	7.13 <sup>b*</sup>	4.69 <sup>c*</sup>	0.96	1.05
<b><i>b</i><sup>*</sup></b>	33.5	25.7 <sup>a*</sup>	22.8 <sup>b*</sup>	21.9 <sup>c*</sup>	0.90	0.93
<b>Diferencia total de color</b>		25.9 <sup>a</sup>	27.8 <sup>b</sup>	30.6 <sup>c</sup>	0.73	

Diferentes letras en la misma fila indican diferencia significativa ( $\alpha = 0.05$ ).

\* en la misma fila indica diferencia significativa (Control = fresco,  $\alpha = 0.05$ ).

Superar los 140 °C, daba como resultado rodajas con color y textura desiguales. Algunas porciones estaban demasiado horneadas y parecían oscuras y rígidas, mientras que otras estaban poco cocidas y permanecían húmedas, pálidas y blandas. Los tiempos de horneado fueron 46 min (100 °C), 32 min (120 °C) y 24 min (140 °C), dichos tiempos se seleccionaron al no observarse cambios en la masa de la muestra, ya que se considera que es cuando las muestras llegan al contenido de humedad en el equilibrio

#### **a Actividad de agua ( $a_w$ )**

La actividad de agua de las rodajas de camote horneadas a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min) ( $2L = 1.5$  mm) disminuyó de 0.303 a 0.226 al aumentar la temperatura de horneado de 100 a 140 °C. Duvivier y col (2010) reportan  $a_w$  de 0.260 en piezas de camote ( $2L = 0.5$  a  $1.0$  cm) secadas a 75 °C por 24 h, Monteiro y col (2020) indican que después de un proceso de secado con microondas que duró 27 min, la  $a_w$  de las rodajas de camote ( $2L = 4.2$  mm) fue de 0.262 y Savas (2022) encontró  $a_w$  de 0.304 para rodajas de camote ( $2L = 4.5$  mm) secadas con aire caliente a 75 °C durante 6 h, en todos los estudios mencionados se observa una reducción en la actividad de agua después de un tratamiento térmico. Las diferencias en esta respuesta pueden estar asociadas a la variedad de camote y a las condiciones de proceso utilizadas. Esta variable es crucial para la estabilidad de los alimentos, ya que al lograr  $a_w$  bajas, generalmente se aumenta el tiempo de almacenamiento debido a la reducción de la actividad química y microbiana (Tortoe y col 2017).

### **b Fracturabilidad ( $F$ )**

La fuerza máxima de fractura de las botanas horneadas a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min) fue 5.62, 4.64 y 4.10, a 100, 120 y 140 °C, respectivamente, con una disminución al aumentar la temperatura. En este estudio, la fuerza de fractura obtenida al final del proceso de horneado es consistente con los resultados reportados por varios autores para botanas de camote, quienes concluyen que sus botanas fueron crujientes y aceptadas adecuadamente por los consumidores. Por ejemplo, Oluwole y col (2014) reportaron 6.50 N para botanas de camote crujientes horneadas a 120 °C por 40 min con un espesor de 3.3 mm, por su parte, Herrera-Jacome (2015) obtuvo 5.30 N para botanas de camote fritas a 120 °C por 14 min con espesor de 2 mm. Asimismo, Anwar y Ghani (2019) estudiaron el horneado a 120 °C durante 20 min de rodajas de 2 mm de espesor y el freído a 180 °C por 1.5 min de rodajas con espesor de 2.5 mm para botanas de camote y obtuvieron fuerzas de fractura de 6.90 y 4.90 N, respectivamente. Las variaciones en la fracturabilidad pueden ser atribuidas al espesor de las botanas, el tipo de proceso al que se someten y a las condiciones de temperatura y tiempo durante su elaboración.

### **c Color y diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

Las variables de color de las botanas horneadas de camote fueron  $L^* = 46.9$ ,  $a^* = 11.6$  y  $b^* = 25.7$  para 100 °C,  $L^* = 46.4$ ,  $a^* = 7.13$  y  $b^* = 22.8$  para 120 °C y  $L^* = 45.0$ ,  $a^* = 4.69$  y  $b^* = 21.9$  para 140 °C, se observó que las tres variables de color disminuyeron con el aumento de la temperatura. La diferencia total de color aumentó con la temperatura, se obtuvo  $\Delta E$  de 25.9, 27.8 y 30.6 para 100, 120 y 140 °C,

respectivamente. La mayor  $\Delta E$  a 140 °C se atribuye a la reducción de la variable  $L^*$  al aumentar la temperatura. Ruttarattanamongkol y col (2016) y Tsai y col (2021) observaron un comportamiento similar, donde las variables de color disminuyen con el procesamiento térmico y reportaron diferencia total de color de 25.0 y 20.7 al tratar térmicamente botanas de camote a 220 °C durante 30 min y 180 °C por 20 min, respectivamente. Los cambios en las variables de color y la diferencia total de color pueden atribuirse a la reacción de Maillard debido a su alto contenido de almidón, la presencia de azúcares reductores (glucosa y fructosa) y aminoácidos reactivos (lisina, arginina e histidina), lo que resulta en el color oscuro encontrado en las rodajas tratadas a 140 °C. Las diferencias entre los resultados de este estudio y los reportados por otros autores pueden estar relacionadas con el proceso de medición y principalmente con las condiciones de proceso (Anwar y Ghani 2019).

## **2 Compuestos bioactivos**

El contraste de los compuestos bioactivos entre las rodajas de camote horneadas respecto a las frescas se presenta en el **Cuadro 7**.

### **a Ácido ascórbico (AA)**

El contenido de ácido ascórbico disminuyó con la temperatura, se obtuvo 39.7, 37.7 y 35.8 mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub> para las botanas de camote horneadas a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min), esto representa retenciones de 47, 44 y 42 %, respectivamente, comparadas con el camote fresco. Esta retención de ácido ascórbico fue superior a la reportada por Ejiofor y Onyeso (2019) de 13 % después de hornear camotes a 130 °C por 12 min.



**Cuadro 7.** Contraste de compuestos bioactivos de rodajas de camote fresco y horneadas a diferentes temperaturas.

<b>Variable</b>	<b>Fresco</b>	<b>100 °C</b>	<b>120 °C</b>	<b>140 °C</b>	<b>LSD</b>	<b>D</b>
<b>Ácido ascórbico</b> (mg <sub>AA</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	84.9	39.7 <sup>a*</sup>	37.7 <sup>b*</sup>	35.8 <sup>c*</sup>	1.36	3.38
<b>Compuestos fenólicos</b> (mg <sub>EAG</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	301	130 <sup>a*</sup>	125 <sup>b*</sup>	120 <sup>c*</sup>	3.49	4.07
<b>Carotenoides totales</b> (mg <sub>EBC</sub> /100 g <sub>s.s.</sub> )	24.1	14.7 <sup>a*</sup>	12.6 <sup>b*</sup>	10.6 <sup>c*</sup>	0.59	0.61

Diferentes letras en la misma fila indican diferencia significativa ( $\alpha = 0.05$ ).

\* en la misma fila indica diferencia significativa (Control = fresco,  $\alpha = 0.05$ ).

Mientras que, a las tres temperaturas estudiadas se obtuvo un contenido de ácido ascórbico mayor que los 25.2 mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub> publicado por Sui y col (2019) después del secado de camote a 60 °C por 12 h. Las reducciones pueden estar asociadas a las condiciones de temperatura y tiempo del tratamiento, además del daño generado por la exposición al oxígeno y la luz durante el proceso de horneado (Ejiofor y Onyeso 2019). Aunque esta reducción era esperada, en este estudio se encontró una retención del 42 % de este nutrimento para las condiciones más severas, lo que puede enaltecer la aceptación de este tipo de botanas saludables por los consumidores.

#### **b Contenido de compuestos fenólicos (CF)**

El contenido de compuestos fenólicos de las rodajas de camote horneadas a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min) fue 130, 125 y 120 mg<sub>EAG</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>, respectivamente, se observó una disminución de esta variable con la temperatura. Sin embargo, se encontró una retención del 40 % para las botanas horneadas a las condiciones más severas (140 °C, 24 min). El mismo comportamiento fue observado por Ooko-Abong y col (2020) y Savas (2022) al secar camote, quienes obtuvieron retenciones de 15 % (70 °C, 12 h) y 43 % (75 °C, 4.4 h), respectivamente. Estos autores también reportan que los fenólicos más representativos en camote son los ácidos clorogénico, cafeico y ferúlico. La reducción en los compuestos fenólicos puede ser atribuida a las condiciones de procesamiento (temperatura y tiempo). Esto puede provocar cambios en la estructura celular del camote, lo que facilita la degradación de los compuestos fenólicos. Además, las condiciones de proceso pueden favorecer la inactivación de

la polifenoloxidasas (enzima que promueve la degradación de los compuestos fenólicos), lo que permite la retención parcial de estos antioxidantes (Musilova y col 2020; Ogliari y col 2020).

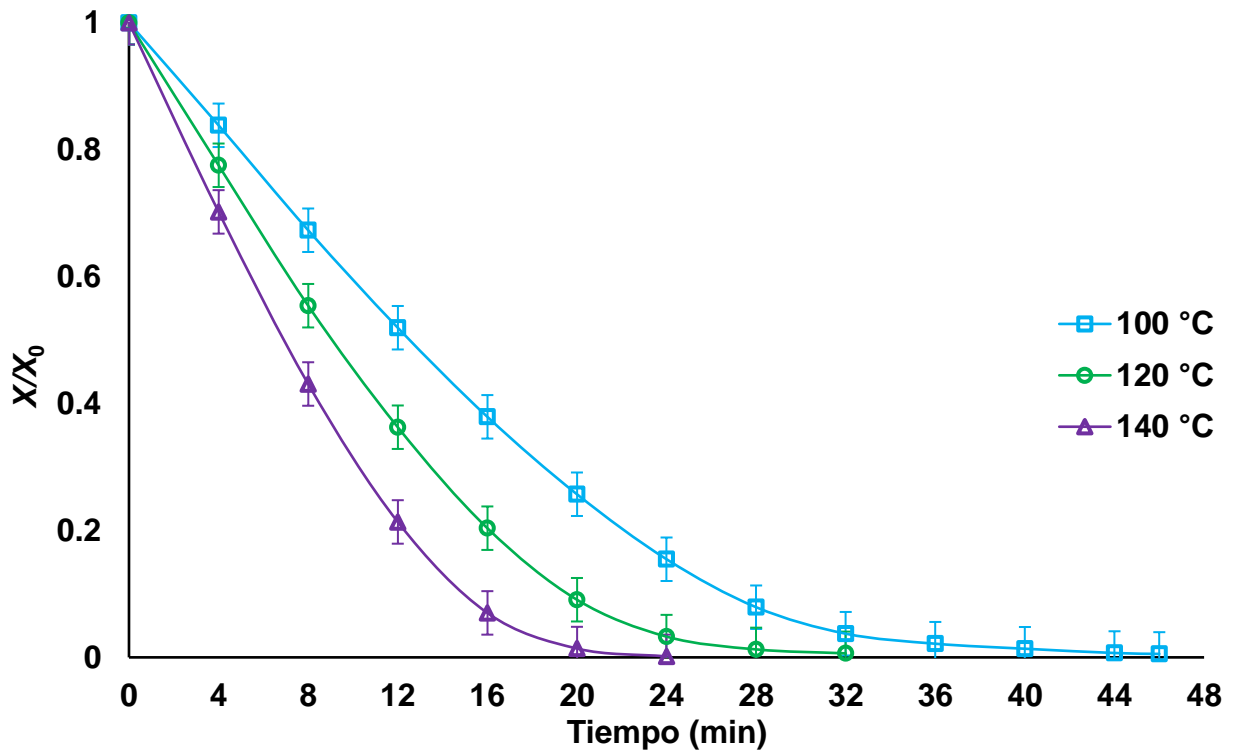
### **c Contenido de carotenoides totales (CT)**

El contenido de carotenoides totales de las botanas de camote horneadas a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min) fue 14.7, 12.6 y 10.6 mg<sub>EBC</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>, respectivamente. Esta variable disminuyó al aumentar la temperatura. El contenido de carotenoides totales obtenido a las condiciones más severas (140 °C, 24 min) representa una retención de 44 %. Otros investigadores reportan un comportamiento similar para esta variable en función de la temperatura: Vidal y col (2018) obtuvieron 10.1 mg<sub>EBC</sub>/100 g<sub>s.s.</sub> para camote horneado a 183 °C por 1 h, contenido que es cercano al rango encontrado en este estudio, mientras que Sui y col (2019) obtuvieron un contenido mayor (34.8 mg<sub>EBC</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>) al secar camotes a 60 °C durante 12 h. La diferencia puede ser atribuida a las condiciones de tratamiento y al proceso aplicado, así como a la metodología utilizada para la medición de la variable.

## **C CINÉTICAS DE HORNEADO DE RODAJAS DE CAMOTE**

### **1 Cinéticas de la razón del contenido de humedad ( $X/X_0$ )**

La **Figura 5** muestra las cinéticas de la razón del contenido de humedad a 100, 120 y 140 °C. El contenido de humedad inicial ( $X_0$ ) fue 5.47, 5.31 y 5.01 kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub> para 100, 120 y 140 °C, respectivamente.



**Figura 5.** Cinéticas de la razón de contenido de humedad ( $X/X_0$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 0.07$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 3$ ).

A la temperatura más alta, el tiempo para alcanzar el equilibrio fue más corto, lo que fue consistente con lo reportado por Santos y col (2019) y Souza y col (2019) para el secado de cáscara de toronja y camote, respectivamente, a temperaturas de 50 a 70 °C y 45 a 75 °C, respectivamente. El comportamiento anterior puede ser explicado por una mayor cantidad de energía proporcionada, lo que promueve una difusión más rápida y da como resultado, tiempos de procesamiento más cortos. La razón del contenido de humedad fue diferente para 120 y 140 °C a 4 min de horneado y para las tres temperaturas hubo diferencia en el intervalo de 8 a 20 min. A los 12 minutos de horneado, el contenido de humedad crítico fue alcanzado para todas las temperaturas estudiadas y el horneado se encontraba en el periodo de velocidad decreciente.

Esta diferencia en la razón del contenido de humedad puede deberse al cambio en la estructura del alimento debido a la temperatura, es decir, un aumento en el número y tamaño de los poros que favorece la movilidad del agua desde el interior del alimento.

## **2 Cinéticas de actividad de agua ( $a_w$ )**

En las cinéticas de actividad de agua ( $a_w$ ) a diferentes temperaturas, **Figura 6**, no se observaron diferencias significativas antes de que se alcanzara el contenido de humedad crítico (menor a 12 min de horneado). Sin embargo, durante el periodo de velocidad decreciente, la mayor temperatura resultó en una menor  $a_w$  con tiempos cortos de procesamiento. Una  $a_w$  menor a 0.6 contribuye a la estabilidad durante el almacenamiento de las botanas. El límite anterior de  $a_w$  se obtuvo en tiempos menores a 32, 24 y 16 min a 100, 120 y 140 °C, respectivamente.

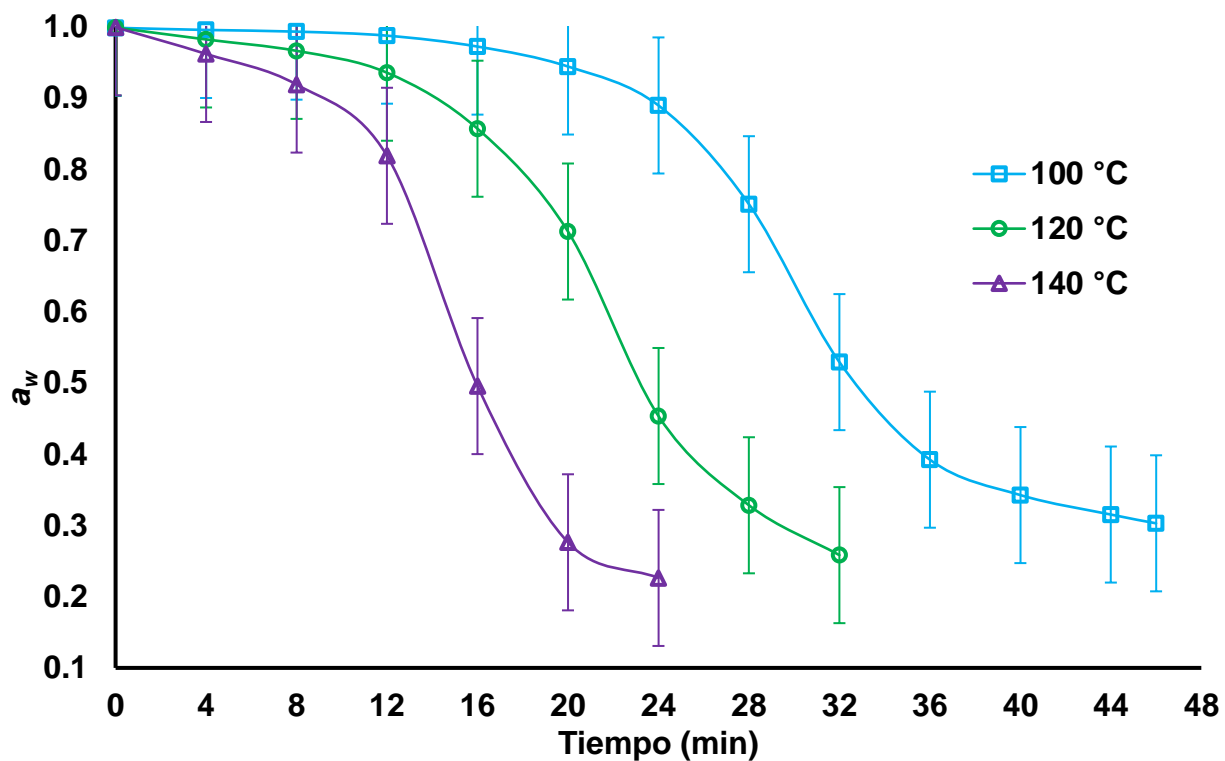


Figura 6. Cinéticas de actividad de agua ( $a_w$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 0.19$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 3$ ).

Tortoe y col (2017) reportaron un rango de  $a_w$  desde 0.52 a 0.60 después de secar camote a 60 °C durante 14 h. Esta reducción en la actividad de agua ayuda a minimizar la actividad química y microbiana, de este modo se incrementa la vida de anaquel de las botanas de camote. Sin embargo, debajo de una actividad de agua alrededor de 0.03 las reacciones de oxidación de lípidos podrían presentarse y con ello provocar una disminución en la vida de anaquel del producto.

### **3 Cinéticas de fracturabilidad (*F*)**

Las cinéticas de fuerza de fractura a las diferentes temperaturas de horneado se muestran en la **Figura 7**. Los primeros minutos (menores que 12 min) correspondientes al periodo de velocidad constante no mostraron diferencia. Después de este tiempo, la fuerza de fractura incrementó hasta alcanzar un máximo y descende hacía el final del proceso de horneado.

La máxima fuerza de fractura a 100, 120 y 140 °C fue alcanzada después de 28 min (24.6 N), 20 min (26.5 N) y 16 min (26.7 N), respectivamente, sin diferencia entre los tratamientos. Las relaciones del contenido de humedad correspondientes fueron 0.08, 0.09 y 0.07, sin mostrar diferencias.

Herrera-Jacome (2015) encontró una fuerza de fractura de 6.1 N para camotes fritos a 120 °C durante 12 min, menor a los obtenidos en este estudio (10.1 N) a esas condiciones de horneado (120 °C durante 12 min). Rahman y col (2017) reportaron una fuerza de 6.40 N después de secar camotes a 140 °C por 12 min, lo cual fue menor que lo encontrado a esa temperatura y tiempo de horneado (11.2 N), debido posiblemente a los diferentes procesos utilizados.

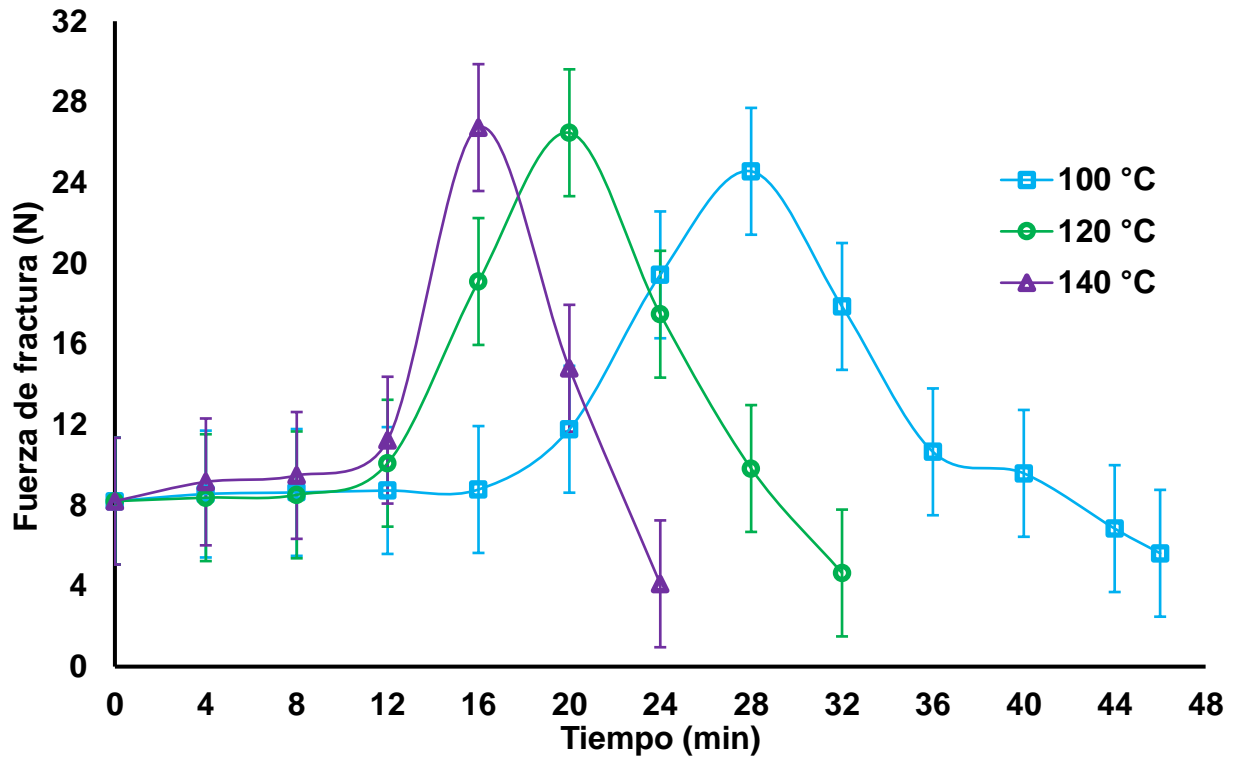


Figura 7. Cinéticas de fracturabilidad ( $F$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 6.30$  N,  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 9$ ).



Monteiro y col (2020) observaron un comportamiento similar en la fuerza de fractura de botanas de camote obtenidas mediante secado con microondas.

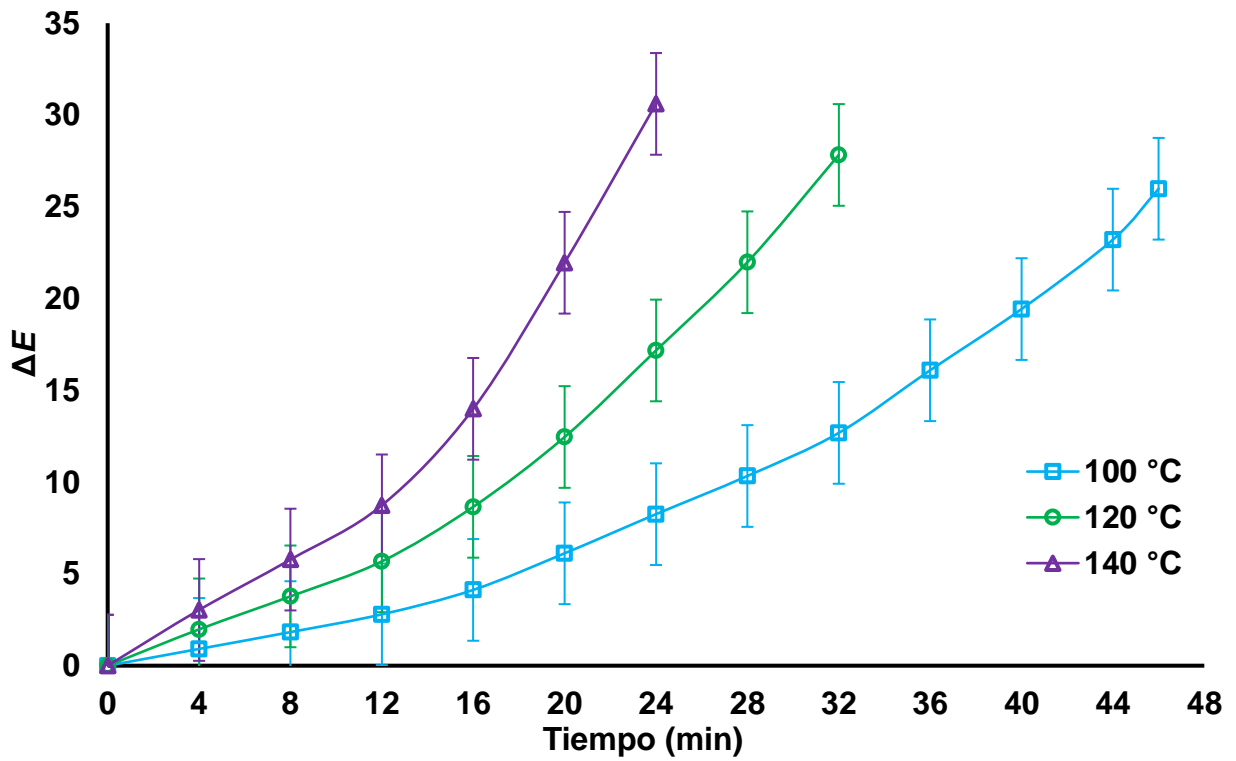
El incremento en la fracturabilidad puede ser atribuido a la formación de una estructura esponjosa. Este fenómeno surge del aumento en el número y tamaño de los microporos, consecuencia de la evaporación repentina. Posteriormente, la pérdida de estos poros, provocada por una reducida eliminación de agua, que promueve el colapso de las paredes celulares y la formación de grietas que debilitan las botanas.

#### **4 Cinéticas de diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

Las cinéticas de diferencia total de color se muestran en la **Figura 8**. En esta se observa que la variable aumenta con el tiempo y la temperatura de exposición, con diferencias en  $\Delta E$  para 100 y 140 °C a los 16 min de horneado. A este tiempo, las rodajas horneadas a 140 y 100 °C han estado en el periodo de velocidad decreciente durante 8 y 4 min, respectivamente.

A una temperatura alta, se ha removido suficiente agua por lo que la variable  $L^*$ , relacionada con la humedad en vegetales, disminuye considerablemente e induce a una mayor  $\Delta E$ .

Onwude y col (2018) obtuvieron un comportamiento similar después de secar camote a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C) y reportaron que a  $\Delta E$  mayores que 10, los cambios en el color son percibidos por el consumidor. En este estudio, ese límite se alcanzó en tiempos menores de 32, 20 y 16 min a 100, 120 y 140 °C, respectivamente.



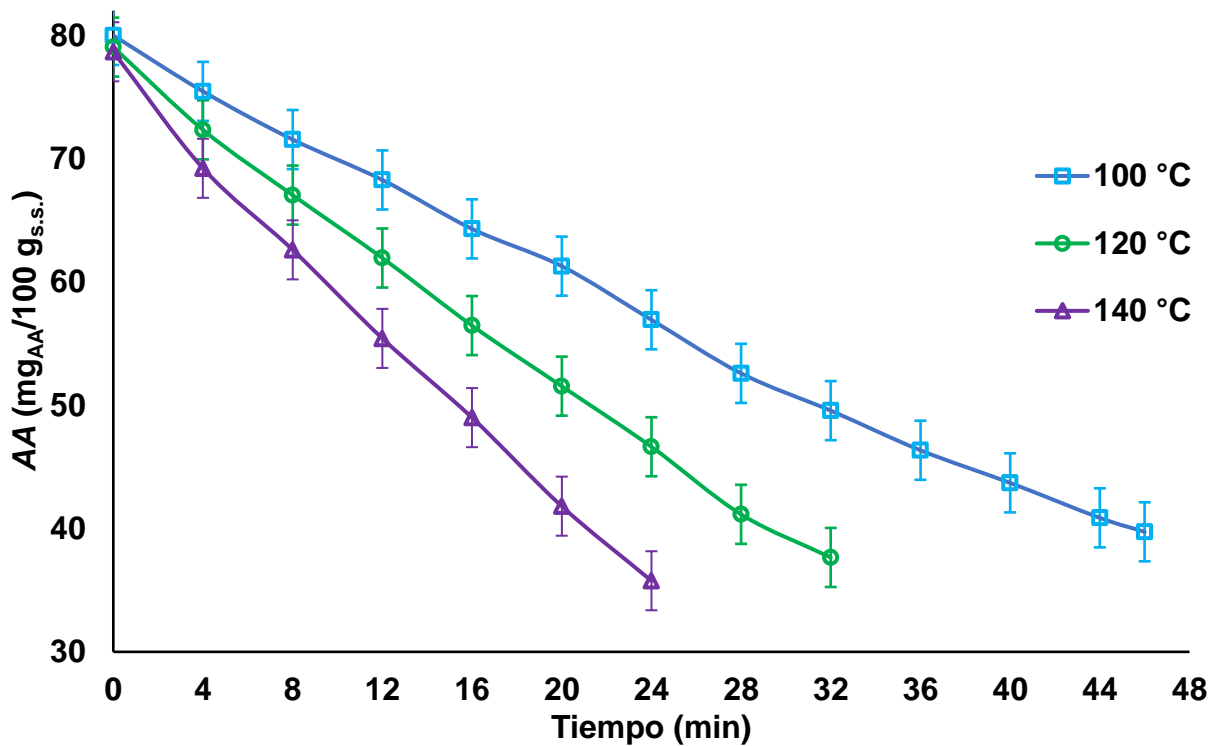
**Figura 8.** Cinéticas de diferencia total de color ( $\Delta E$ ) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 5.5$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $n = 9$ )

Sin embargo, la diferencia de color final de las botanas de camote es fácilmente percibida en todas las condiciones estudiadas.

## **5 Cinéticas de contenido de ácido ascórbico (AA)**

Las cinéticas de ácido ascórbico se presentan en la **Figura 9**. El ácido ascórbico disminuyó de manera exponencial en función de la temperatura y el tiempo de horneado, con diferencias entre las tres temperaturas a partir de los 12 min de tratamiento, tiempo en el cual las rodajas horneadas a 120 y 140 °C ya estuvieron 4 min en el periodo de velocidad decreciente, mientras que las rodajas procesadas a 100 °C continúan en el periodo de velocidad constante. Aún con el procesamiento de horneado a 100 °C (46 min), 120 °C (32 min) y 140 °C (24 min), se logró retener 39.7, 37.7 y 35.8 mg<sub>AA</sub>/100 g<sub>s.s.</sub>, lo que representa retenciones de 46.8, 44.4 y 42.1 %, respectivamente. La disminución del ácido ascórbico puede atribuirse a que se presente una degradación progresiva en función de la temperatura y del tiempo de proceso, debido a que es un compuesto bioactivo termolábil, inestable durante el calentamiento y sensible a la luz y al oxígeno.

El oxígeno presente durante el horneado podría hacer que se genere una reacción oxidativa irreversible del ácido ascórbico, ya que el incremento de la temperatura y del tiempo de exposición, ocasionan la oxidación del ácido ascórbico a la forma dehidroascórbico, la hidrólisis del ácido dehidroascórbico al ácido 2,3-dicetogulónico y la generación por polimerización de productos inactivos nutrimentalmente (Damiano-Vásquez 2019; Leandro-Laguna 2021).



**Figura 9.** Cinéticas de ácido ascórbico (AA) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 4.8$  mgAA/100 g<sub>s.s.</sub>,  $\alpha = 0.5$ ,  $n = 3$ )

Además, Damiano-Vásquez (2019) menciona que la degradación de ácido ascórbico siempre se ve incrementada por el aumento de oxígeno presente en el medio o mezcla de aire y que la oxidación será mayor cuando la superficie de la muestra (camote) esté en rodajas y se encuentre en contacto directo con el aire, como es el caso de este estudio. Canahualpa-Carhuamaca y Solano-Gómez (2018) reportan un comportamiento similar en su estudio, en el cual el contenido de ácido ascórbico en rodajas de mashua negra disminuyó durante el secado a 40 °C (300 min), 50 °C (240 min) y 60 °C (180 min), con retenciones del 56.0, 53.2 y 50.2 %, respectivamente. Damiano-Vásquez (2019) indicó que al secar frutos de aguaymanto hubo una disminución del ácido ascórbico al incrementar la temperatura del aire de 40, 50 y 60 °C, con retenciones de 62.8, 51.4 y 42.5 %, respectivamente. Leandro-Laguna (2021) analizó que el contenido de ácido ascórbico se redujo con la temperatura de estudio (70, 80 y 90 °C) y demostró que a medida que la temperatura y el tiempo de proceso aumentan, la concentración de dicho compuesto se reduce. Al secar a 70 °C durante 10, 20, 30 y 40 min, se obtuvieron retenciones del 73.6, 62.9, 58.0 y 40.8 %, respectivamente, en el tratamiento a 80 °C por 10, 20, 30 y 40 min, las retenciones fueron del 68.9, 61.9, 53.3 y 35.2 %, respectivamente, mientras que, a 90 °C con tiempos de 10, 20, 30 y 40 min encontró menores retenciones, las cuales fueron de 59.5, 54.9, 36.6 y 22.1 %, respectivamente. Dicho autor concluyó que el tiempo de tratamiento térmico afectó en mayor medida la degradación del ácido ascórbico en pulpa de camu camu. Por su parte, Chica-Barco (2022) también reportó que el tiempo y la temperatura de procesamiento (secado) disminuyó el contenido de ácido ascórbico en granos de

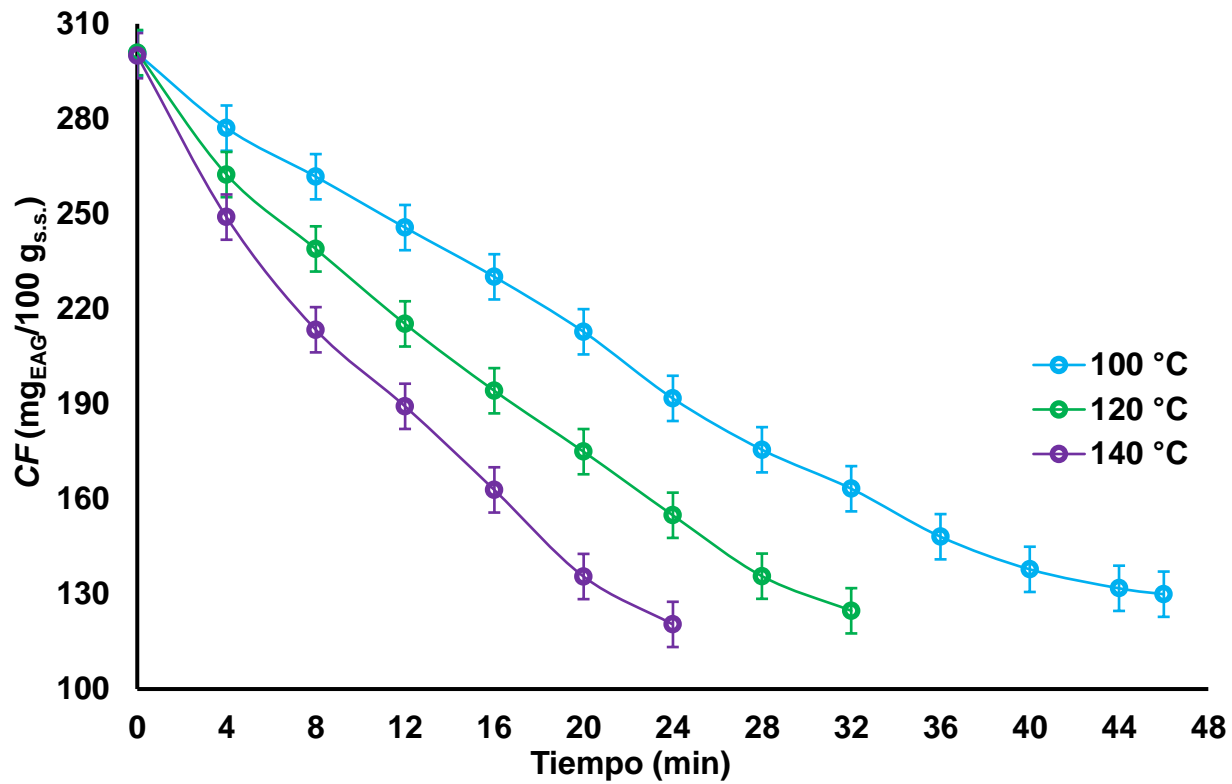
cacao, con retenciones de 53.9, 50.2 y 47.0 %, para muestras tratadas a 50 °C durante 31 h, 60 °C por 19 h y 70 °C por 15 h, respectivamente.

## **6 Cinéticas de contenido de compuestos fenólicos (CF)**

Las cinéticas de compuestos fenólicos se muestran en la **Figura 10**. Esta variable mostró un comportamiento de disminución con el tiempo y la temperatura de horneado. Hubo diferencia entre 100 y 140 °C a los 4 min de horneado y para las tres temperaturas a partir de los 8 min, cuando las rodajas de camote horneadas a 120 y 140 °C ya se encuentran en el periodo de velocidad decreciente. La estabilidad de compuestos fenólicos se ve afectada por el proceso de horneado, lo cual podría atribuirse al hecho de que los polifenoles son sensibles a la temperatura, al oxígeno y al ambiente atmosférico (Sui y col 2019). El proceso de horneado favorece la destrucción de la pared celular de los alimentos, situación que conduce a una liberación acelerada de los compuestos fenólicos, seguida de una degradación de estos por efecto de la temperatura, hecho que pudiera compensar la disminución de su contenido (Ouyang y col 2021; Savas 2022).

Además, los compuestos fenólicos se oxidan fácilmente bajo la influencia de procesos largos con aire caliente, circunstancia que causa que el agua en la muestra se evapore rápido y se reduzca el contenido nutrimental de sustancias como los compuestos fenólicos (Thao y col 2023).

Chica-Barco (2022) realizó cinéticas de compuestos fenólicos para el secado de granos de cacao a 50, 60 y 70 °C y observó una disminución de dichos compuestos con la temperatura y el tiempo de procesamiento.



**Figura 10.** Cinéticas de compuestos fenólicos (*CF*) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 14.3 \text{ mg}_{EAG}/100 \text{ g}_{s.s.}$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $n = 3$ )

Mera-Campos (2022) obtuvo cinéticas de compuestos fenólicos durante la pasteurización de zumo de mora a 75, 80 y 85 °C y encontró que los compuestos fenólicos disminuyeron con el tiempo del proceso, así como con el aumento de la temperatura empleada. Por su parte, Jha y Sit (2020) y Thao y col (2023) mencionan que la velocidad de degradación de los *CF* es mayor al incrementar la temperatura.

### **7 Cinéticas de carotenoides totales (CT)**

Las cinéticas de carotenoides totales se observan en la **Figura 11**. Los carotenoides totales disminuyeron con el aumento de la temperatura y el tiempo de horneado, se encontró diferencia entre las tres temperaturas a partir de los 16 min de tratamiento, tiempo en el cual las rodajas de camote horneadas a 100 °C han estado 4 min en el periodo de velocidad decreciente y las cinéticas a 120 y 140 °C ya estuvieron 8 min en dicho periodo. Después del procesamiento se obtuvieron 13.9, 12.6 y 10.7 mg<sub>EBC</sub>/100 g<sub>s.s.</sub> a 100, 120 y 140 °C, respectivamente, hecho que representa una retención de 57.6, 52.2 y 44.4 %.

Xiao y col (2018), describen que diferentes carotenoides disminuyen con la temperatura y el tiempo de proceso, debido a su estructura altamente insaturada, los carotenos son propensos a la oxidación, isomerización y degradación, fenómenos que pueden ser provocados por exposición al calor, oxígeno, luz y otros factores.



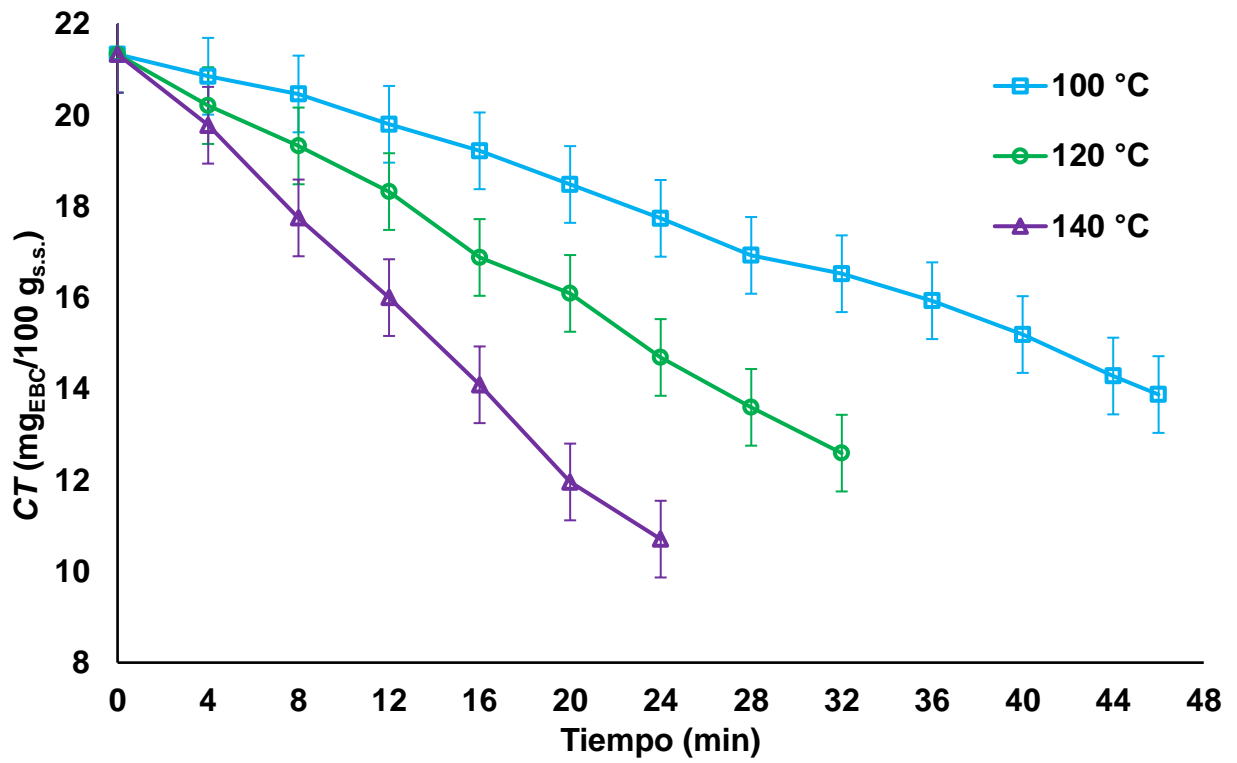


Figura 11. Cinéticas de carotenoides totales (CT) a 100, 120 y 140 °C ( $LSD = 1.7$  mgEBC/100 g<sub>s.s.</sub>,  $\alpha = 0.5$ ,  $n = 3$ ).

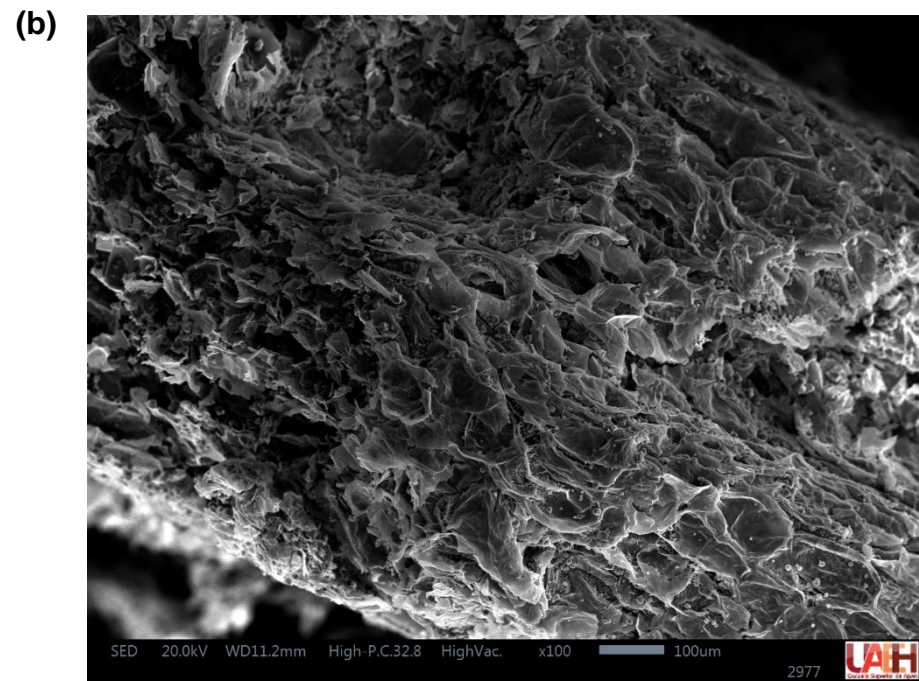
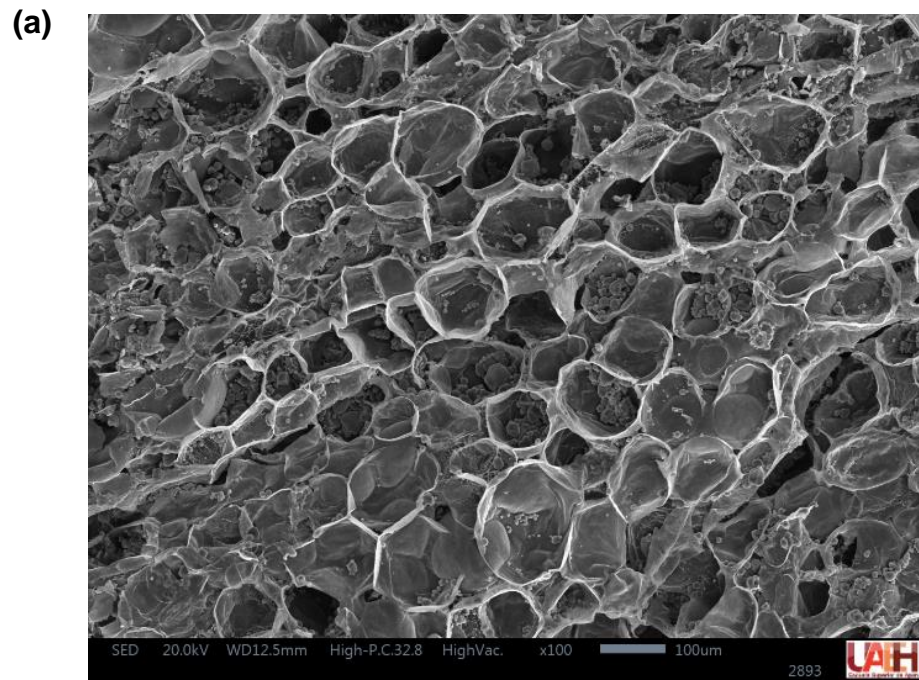
Además, encontraron retenciones que van desde 0.7 hasta 51.9 % de diferentes carotenoides (luteína, zeaxantina,  $\beta$ -criptoxantina y  $\beta$ -caroteno) al ser tratados a 25, 35 y 45 °C durante tiempos que van de 2.5 a 8 h y establecen que la estabilidad térmica y el mecanismo de degradación de dichos compuestos son afectados por la configuración geométrica, ya que al contener menos enlaces dobles conjugados coplanares y grupos hidroxilo los hace más estables.

Por su parte, Damiano-Vásquez (2019) explica que durante el horneado se genera una degradación de carotenoides, la cual varía en función de la matriz alimentaria y las condiciones de proceso, ya que se da la pérdida de la integridad de los tejidos, al estar mayor tiempo en contacto con el oxígeno y la luz. Además, la elevación de la temperatura durante el tratamiento térmico aumenta drásticamente la velocidad de reacción de degradación de dichos compuestos y ellos reportan retenciones de 63.0, 45.2 y 38.8 % de carotenoides en aguaymanto secado a 40, 50 y 60 °C, respectivamente.

## **D ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE RODAJAS DE CAMOTE FRESCAS Y HORNEADAS**

### **1 Microscopía electrónica de barrido**

En la **Figura 12** se presentan las microfotografías de la sección longitudinal **(a)** y transversal **(b)**, respectivamente, de las rodajas de camote en fresco.



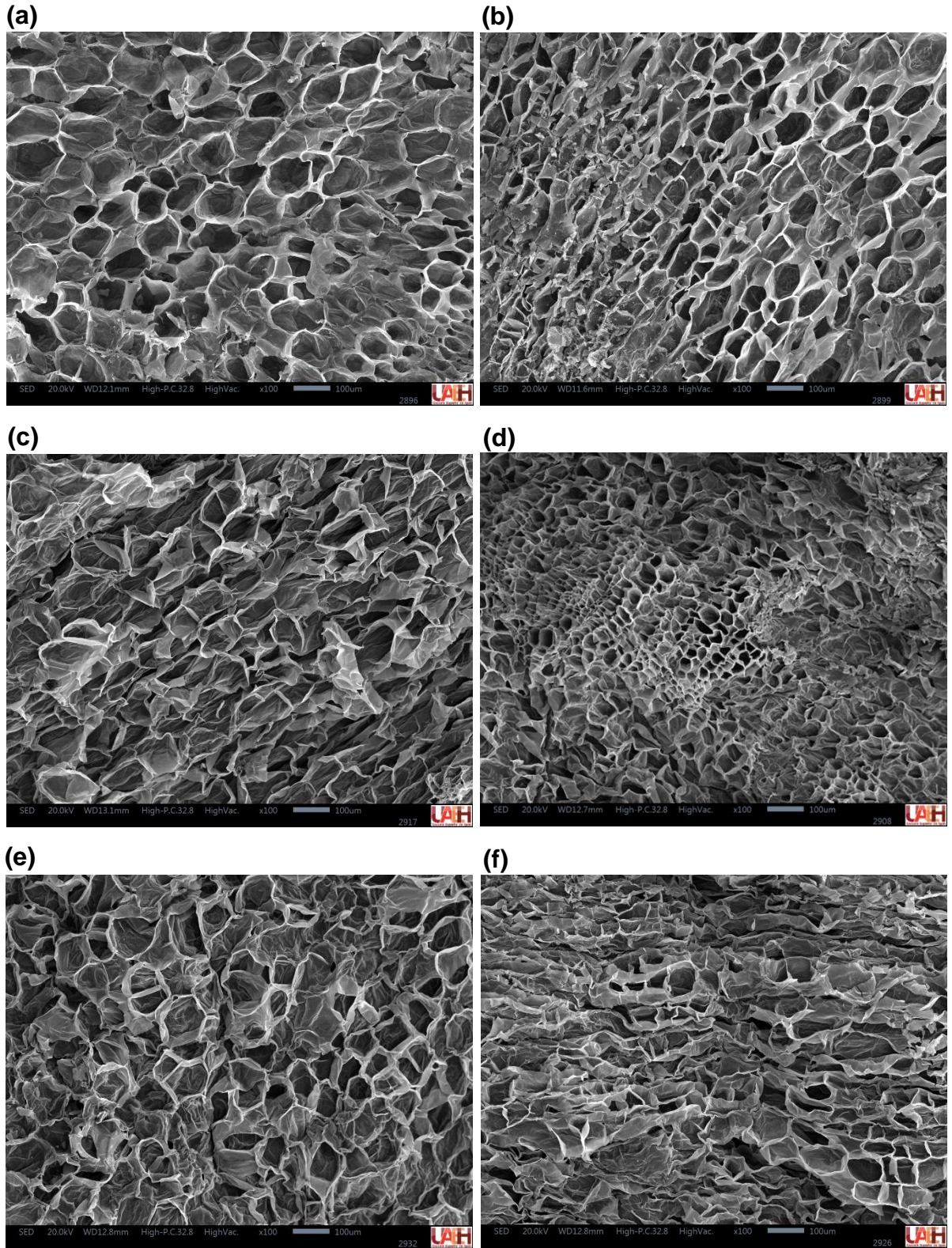
**Figura 12.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista (a) longitudinal y (b) transversal de rodajas de camote frescas.

En esta se observa que la estructura celular del camote es poligonal y prominente, con gránulos de almidón regulares de formas ovaladas y esféricas, aspecto que concuerda con lo reportado por Onwude y col (2018) y Gasa y col (2022). En las **Figuras 13, 14 y 15** se aprecia la vista longitudinal de las rodajas de camote horneadas a 100, 120 y 140 °C, respectivamente. En dichas fotografías se aprecia que las muestras de camote tratadas térmicamente fueron modificadas significativamente en la composición celular y estructural. En las microfotografías longitudinales puede observarse la ruptura de las paredes celulares, deformación y plegamiento de las células, esto provoca la desaparición de la forma poligonal interna definida en las muestras sin tratamiento térmico (frescas), esto concuerda con lo reportado por Onwude y col (2018) en el secado de rodajas de camote a 70 °C, Wang y col (2020) para camote secado a 60, 70, 80, 90, 100 y 110 °C, Gasa y col (2022) en rodajas de camote tratadas térmicamente a 70 °C y Savas (2022) al analizar rodajas de camote secadas a 63.8 °C.

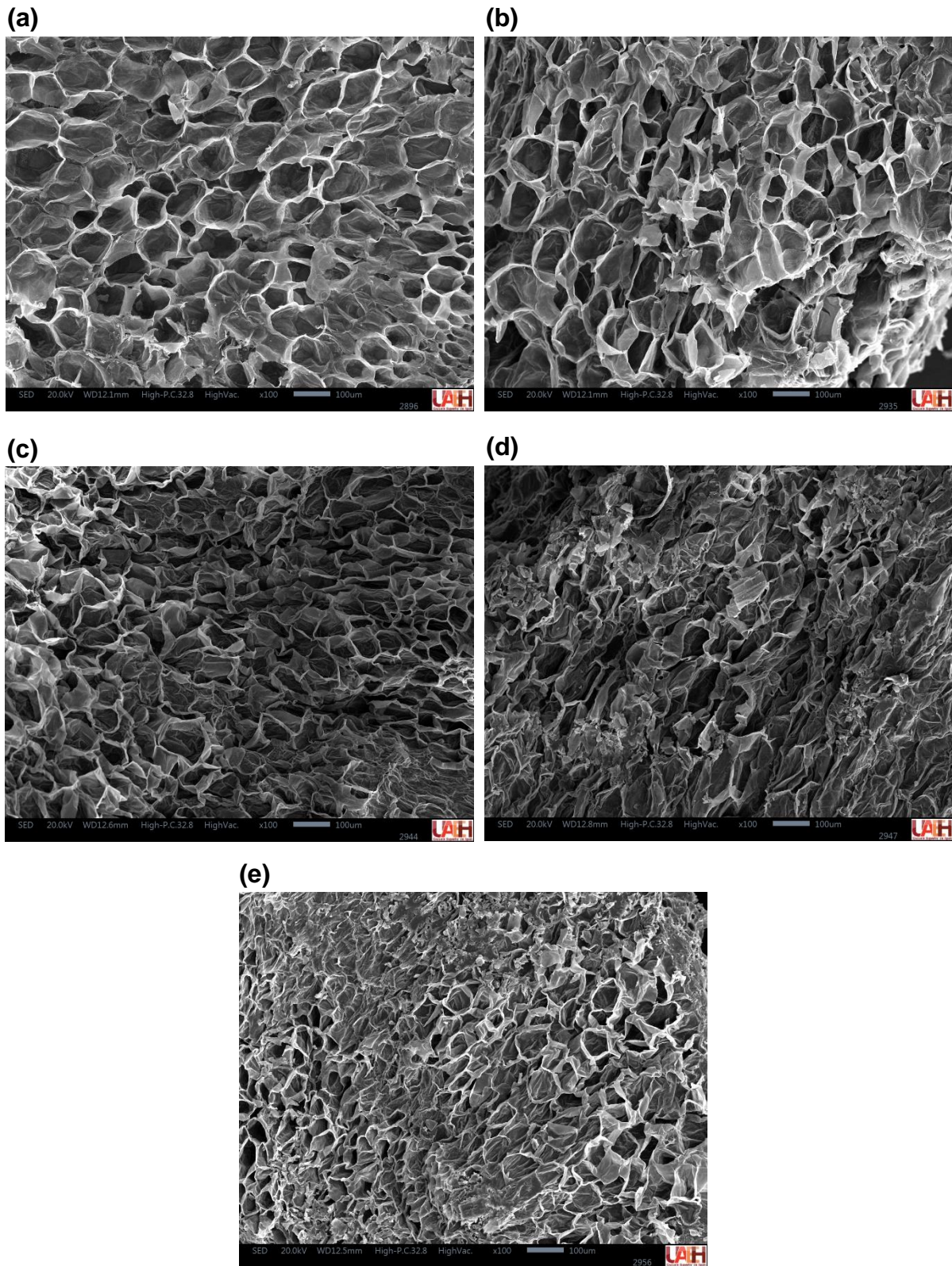
El comportamiento observado puede deberse a que el incremento de temperatura promueve la difusión de vapor de agua dentro de las muestras, lo que conduce a una disminución del agua, lo cual conlleva a un aumento en la tensión celular y provoca la formación de poros, lo que da como resultado muestras fisuradas y porosas (Onwude y col 2018; Savas 2022).

## **2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)**

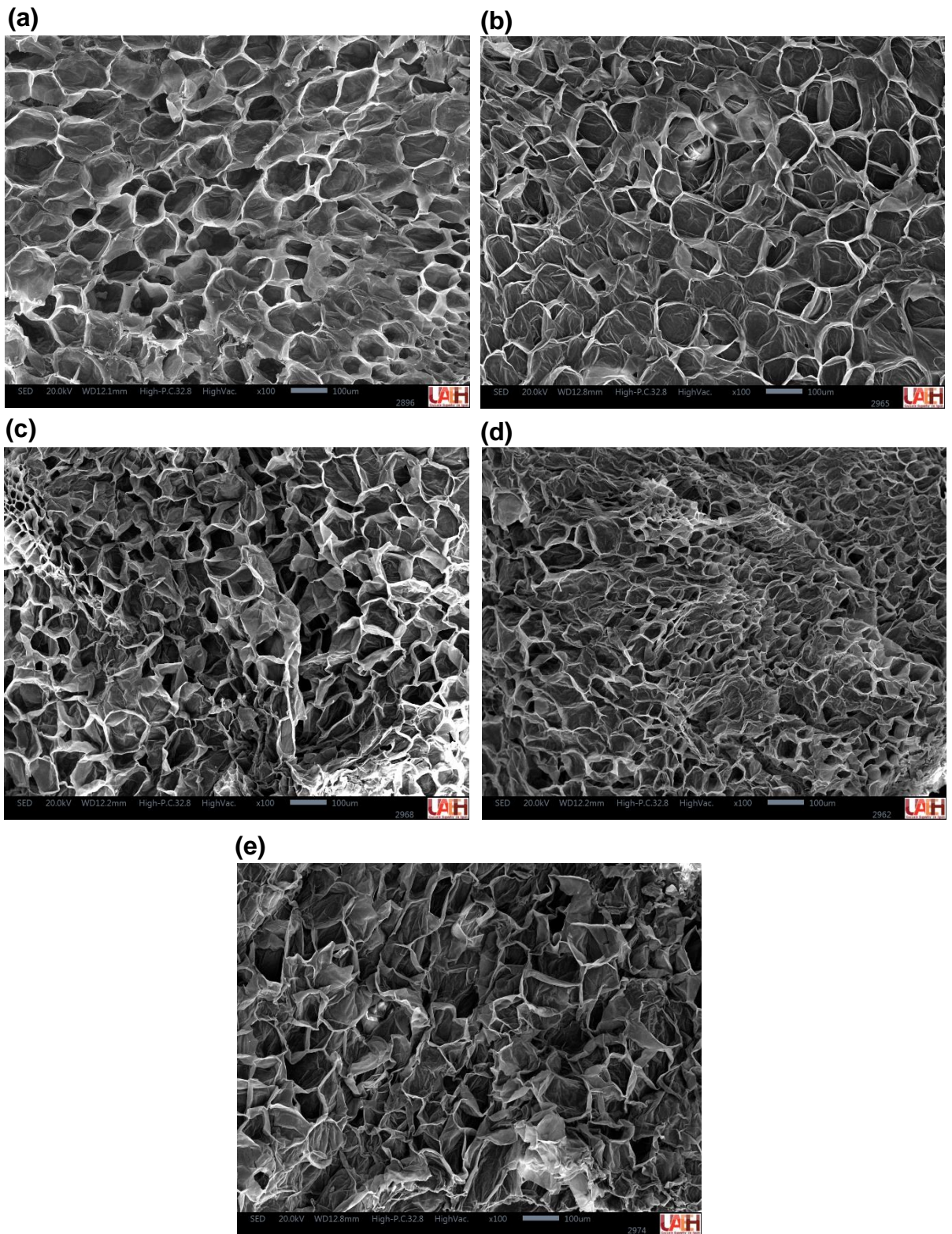
Los resultados obtenidos en el análisis de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier para rodajas de camote fresco, escaldado y horneado a 100 °C (28 min), 120 °C (20 min) y 140 °C (16 min) se presentan en la **Figura 16**.



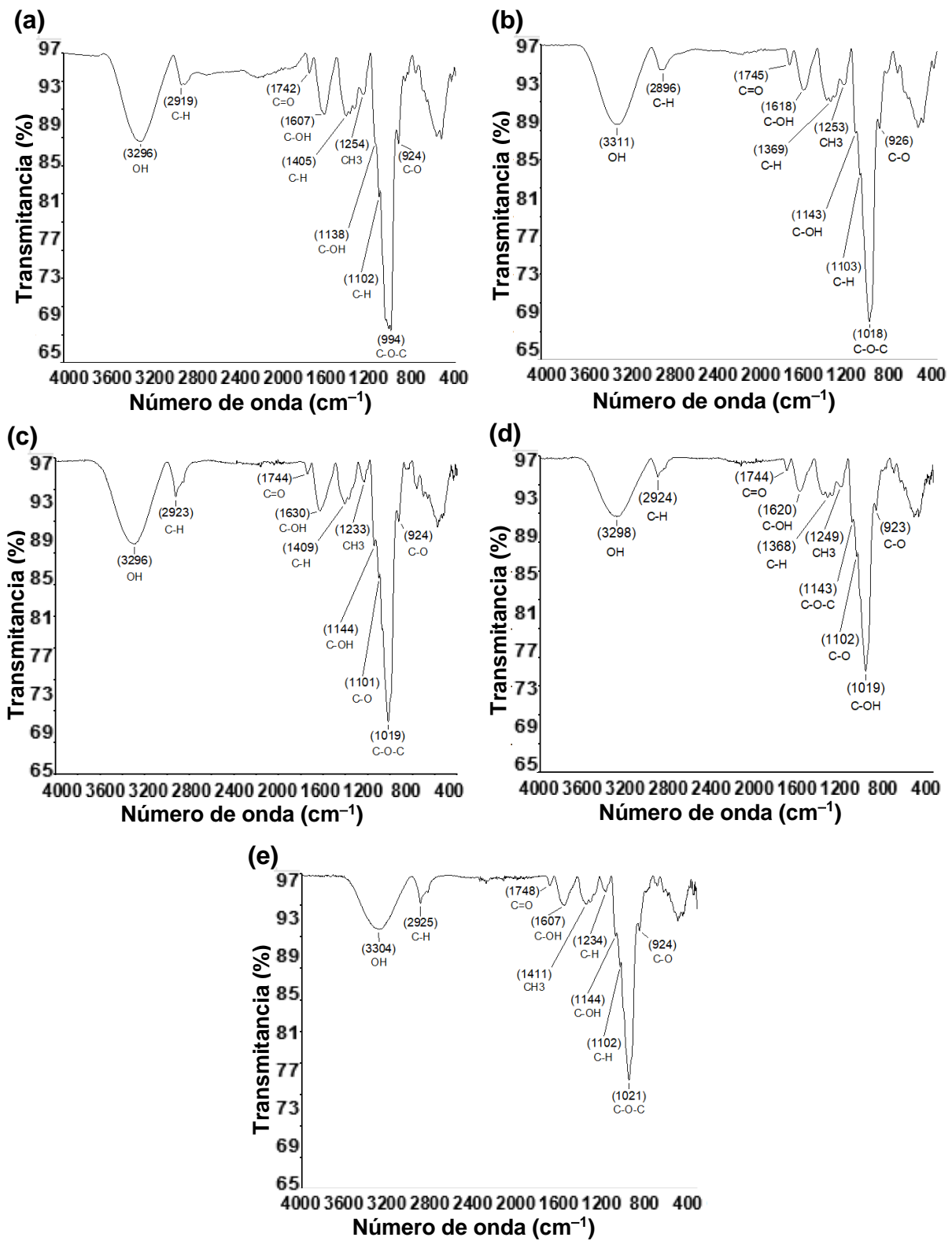
**Figura 13.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 100 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 16, (d) 28, (e) 40 y (f) 46 min.



**Figura 14.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 120 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 4, (c) 8, (d) 20 y (e) 32 min.



**Figura 15.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista longitudinal de rodajas de camote horneadas a 140 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 8, (c) 12, (d) 16 y (e) 24 min.



**Figura 16.** Espectros FTIR de rodajas de (a) camote fresco, (b) escaldado, y horneado a (c) 100 °C por 28 min, (d) 120 °C por 20 min y (e) 140 °C por 16 min.



En los espectros FTIR obtenidos, se observan señales similares localizadas en intervalos cercanos de número de onda, diferenciándose principalmente en la intensidad de transmitancia. A continuación, se describen los rangos de número de onda identificados y las atribuciones correspondientes a los grupos funcionales:

- Entre **3296** y **3311  $\text{cm}^{-1}$** , se detectó una señal asociada al estiramiento del grupo hidroxilo (O–H).
- En el intervalo de **2896** a **2925  $\text{cm}^{-1}$** , se registró una banda atribuible al estiramiento del enlace C–H.
- Un pequeño pico entre **1742** a **1748  $\text{cm}^{-1}$** , corresponde a las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo (C=O).
- Las señales entre **1607** a **1630  $\text{cm}^{-1}$** , se asignan a las vibraciones del grupo C–OH, relacionadas con el agua estructuralmente ligada en la muestra.
- La banda tripleta identificada entre **1368** a **1411  $\text{cm}^{-1}$** , se atribuye a la deformación del grupo C–H.
- Entre **1233** y **1254  $\text{cm}^{-1}$** , se observa una señal derivada de la tripleta mencionada previamente.
- Finalmente, las señales en el rango de **923** a **1144  $\text{cm}^{-1}$** , están asociadas al estado amorfo (grado de orden) del almidón, involucrando principalmente flexión y estiramiento en enlaces funcionales como hidroxilos (C–OH), éteres (C–O–C) y enlaces simples (C–O).

Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios previos para almidón de camote por Avula (2005), De Souza y col (2020), Ulfa y col (2020), Sohany y col (2021) y Escobar-Puentes y col (2022). Las diferencias en la intensidad de la transmitancia de las señales entre los diferentes tratamientos estudiados (espectros) pueden atribuirse a variaciones en la cristalinidad del almidón, alteraciones en la conformación y orientación de las moléculas, pérdida de agua y ruptura de enlaces, particularmente de hidrógeno, como resultado del efecto de la temperatura de proceso.

## **E PARÁMETROS DE DIFUSIÓN DE RODAJAS DE CAMOTE HORNEADAS**

### **1 Contenido de humedad inicial, crítico y en el equilibrio**

En el **Cuadro 8** se presenta la humedad inicial, crítica y en equilibrio de las rodajas de camote horneadas a 100, 120 y 140 °C. El contenido de humedad inicial se encontró entre 5.01 y 5.47  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ , el contenido de humedad crítico de las rodajas de camote horneadas varió de 2.50 a 2.71  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ , mientras que el contenido de humedad en el equilibrio alcanzado en las tres temperaturas fue de 0.03  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ . Onwude y col (2018) reportaron un contenido de humedad inicial de 3.4  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  para camote secado a 70 °C, mientras que Souza y col (2019) encontraron un contenido de humedad inicial de 3.8  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  para camote secado a 75 °C, ambos inferiores a lo obtenido en esta investigación, lo que puede deberse al proceso de escaldado que se les realizó a las rodajas de camote previo al horneado. Por otra parte, Souza y col (2019) también reportan un contenido de humedad en equilibrio de 0.05  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  para camote secado a 75 °C, similar al encontrado en este proyecto y a lo reportado para botanas.

**Cuadro 8.** Contenido de humedad inicial, crítico y de equilibrio en las cinéticas de horneado a diferentes temperaturas.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>X_0</math> (kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub>)</b>	<b><math>X_c</math> (kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub>)</b>	<b><math>X_\infty</math> (kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub>)</b>
100	5.47 <sup>a</sup>	2.55 <sup>a</sup>	0.03 <sup>a</sup>
120	5.31 <sup>a</sup>	2.71 <sup>a</sup>	0.03 <sup>a</sup>
140	5.01 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>	0.03 <sup>a</sup>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, prueba de Fisher ( $LSD = 0.90, 0.88$  y  $0.003$  kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub> para  $X_0, X_c$  y  $X_\infty$ , respectivamente,  $\alpha = 0.05, n = 3$ ).

## 2 Densidad de flujo de masa y coeficiente de transferencia de masa

La densidad de flujo de masa y el coeficiente de transferencia de masa obtenidos a las diferentes temperaturas se presentan en el **Cuadro 9**. En este se observa que  $N_c$  y  $k_Y$  aumentaron de  $7.15 \times 10^{-5}$  a  $1.29 \times 10^{-4}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}$  y de  $1.49 \times 10^{-3}$  a  $2.70 \times 10^{-3}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}\Delta Y$ , respectivamente, al incrementar la temperatura de horneado.

Este comportamiento concuerda con lo encontrado por Sáez-Ceniceros (2019) en el secado de pera, el autor reporta  $N_c$  entre  $2.27 \times 10^{-4}$  a  $3.86 \times 10^{-4}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}$  y  $k_Y$  de  $9.8 \times 10^{-3}$  a  $1.82 \times 10^{-2}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}\Delta Y$ , al incrementar la temperatura de 60 a 80 °C y con lo reportado por Pacheco-Plata y col (2024), en el horneado de rodajas de papa a diferentes temperaturas que obtuvieron  $N_c$  entre  $5.7 \times 10^{-4}$  a  $7.5 \times 10^{-4}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}$  y  $k_Y$  de  $1.6 \times 10^{-2}$  a  $1.8 \times 10^{-2}$   $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2\text{s}\Delta Y$ . Las diferencias con lo obtenido en este proyecto pueden explicarse por las diferencias en la estructura de cada alimento y a las condiciones de proceso. El incremento de la densidad de flujo de masa puede deberse a que, a temperaturas más altas, la fuerza impulsora ( $\Delta Y$ ) y la capacidad del aire para retener humedad se incrementan. Al aumentar la densidad de flujo de masa, se incrementa la rapidez de eliminación de agua, por lo que el coeficiente de transferencia de masa también sigue ese comportamiento (Sáez-Ceniceros 2019).

**Cuadro 9.** Densidad de flujo de masa y coeficiente de transferencia de masa a diferentes temperaturas.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>N_c</math> (kg<sub>agua</sub>/m<sup>2</sup>s)</b>	<b><math>k_Y</math> (kg<sub>agua</sub>/m<sup>2</sup>sΔY)</b>
100	$7.15 \times 10^{-5c}$	$1.49 \times 10^{-3c}$
120	$9.58 \times 10^{-5b}$	$2.00 \times 10^{-3b}$
140	$1.29 \times 10^{-4a}$	$2.70 \times 10^{-3a}$

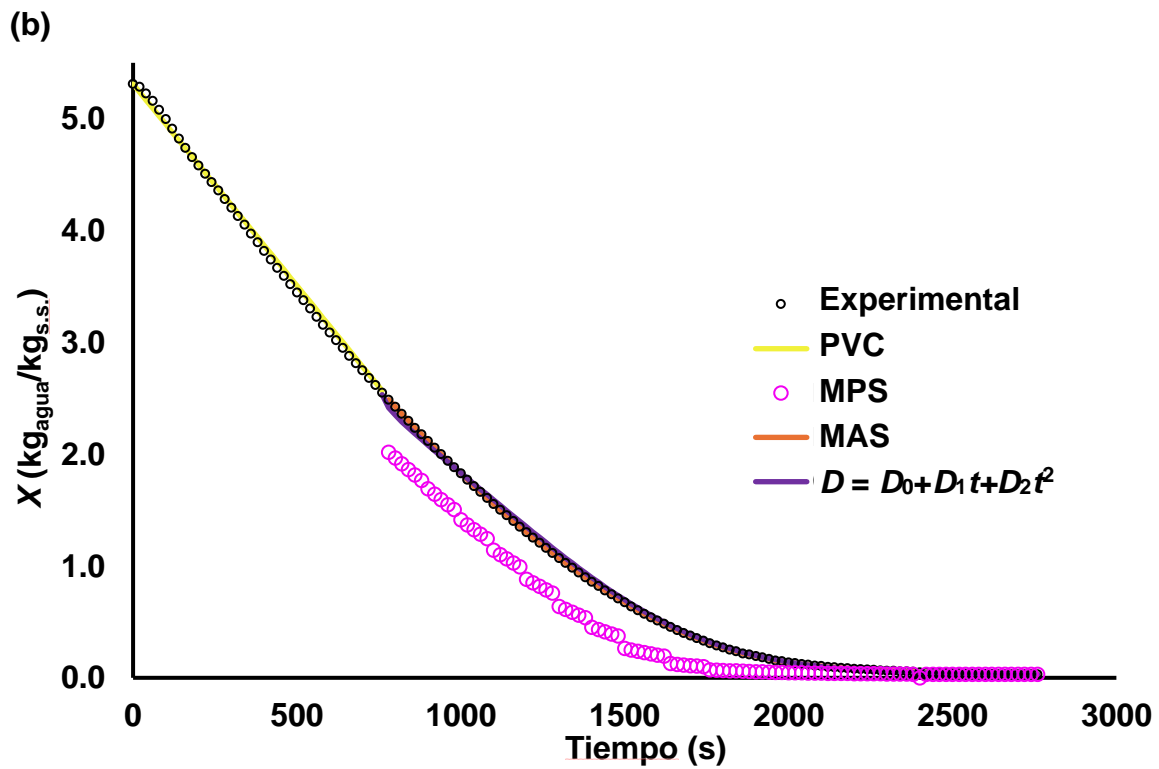
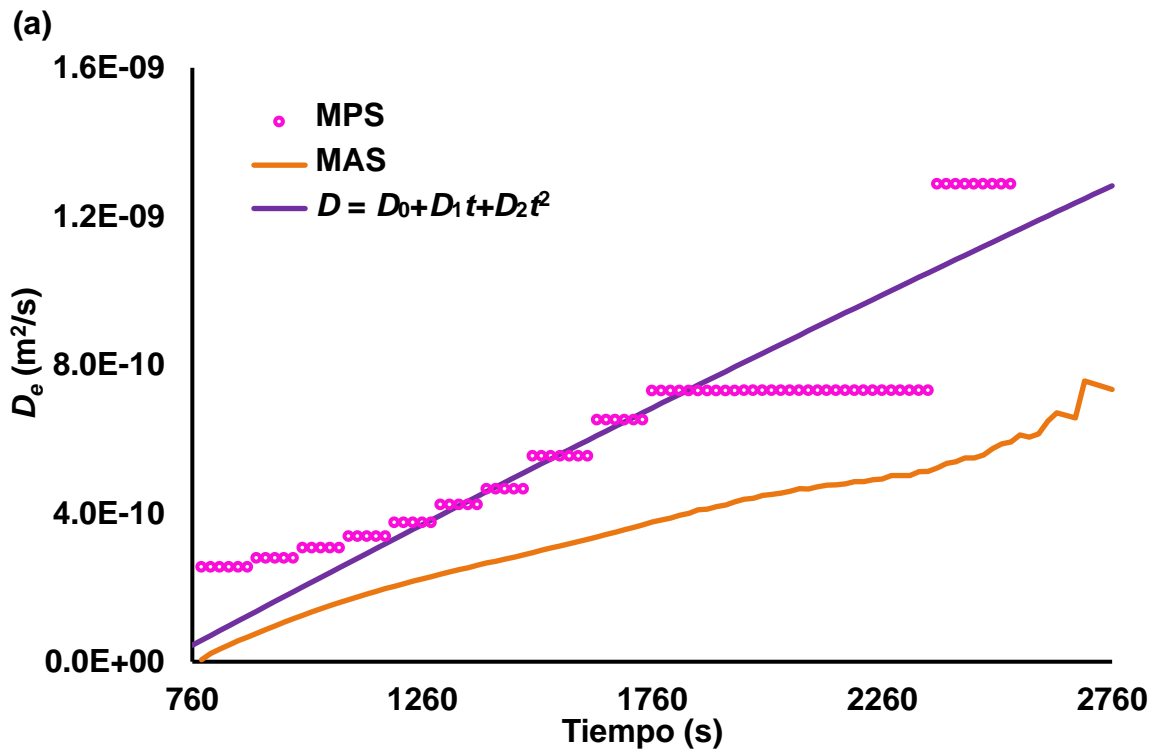
Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, prueba de Fisher ( $LSD = 5.78 \times 10^{-6}$  kg<sub>agua</sub>/m<sup>2</sup>s y  $1.15 \times 10^{-4}$  kg<sub>agua</sub>/kg<sub>s.s.</sub> para  $N_c$  y  $k_Y$ , respectivamente,  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 3$ ).

### 3 Difusividad efectiva constante

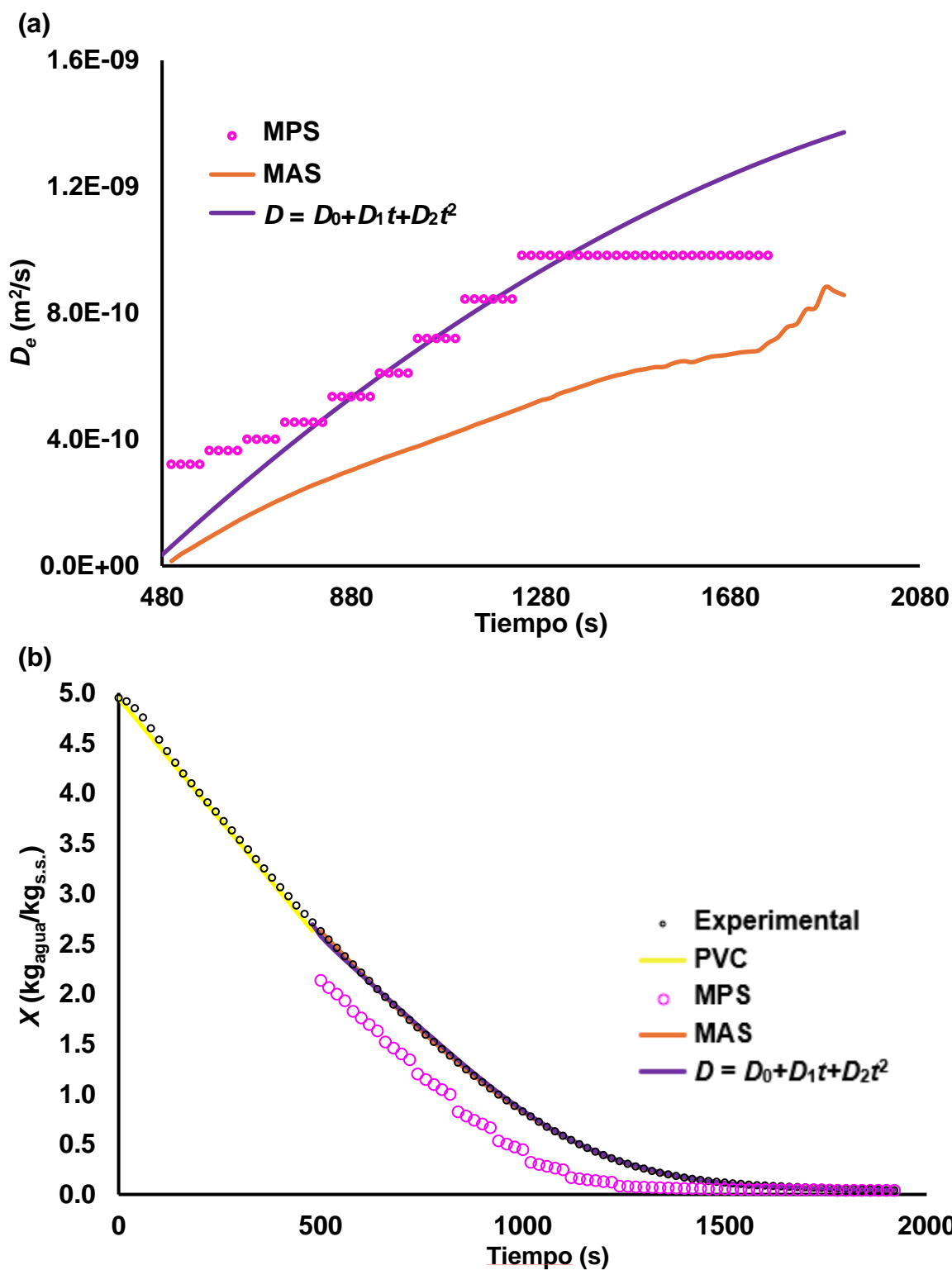
#### a Método de Pendientes por Subperiodos (MPS)

Las difusividades efectivas calculadas con el método de aproximaciones sucesivas y la predicción del contenido de humedad promedio para el periodo de velocidad decreciente de las cinéticas de horneado a 100, 120 y 140 °C, obtenida con estas difusividades, se presentan en las **Figuras 17, 18 y 19**, respectivamente, se obtuvieron difusividades constantes con el método de pendientes por subperiodos en el rango de  $2.5 \times 10^{-10}$  a  $1.3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para 100 °C,  $3.2 \times 10^{-10}$  a  $9.8 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 120 °C y de  $4.5 \times 10^{-10}$  a  $1.9 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 140 °C.

Esta difusividad aumenta al incrementar la temperatura y fue similar a la difusividad obtenida por Souza y col (2019) al emplear la segunda ley de Fick en el secado de camote a 77 °C. Pacheco-Plata y col (2024) reportan difusividades obtenidas con el método de pendientes por subperiodos en horneado de papa, que van de  $4.5 \times 10^{-10}$  a  $2.0 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (110 °C),  $4.6 \times 10^{-10}$  a  $1.7 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (120 °C) y  $5.3 \times 10^{-10}$  a  $2.2 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (130 °C), las cuales también aumentaron con la temperatura y fueron de orden similar a las encontradas en este estudio. Las diferencias en las difusividades pueden atribuirse a la estructura de la muestra utilizada, así como las condiciones de procesamiento. Las difusividades obtenidas permiten la predicción del contenido de humedad promedio en el periodo de velocidad decreciente, el cual no presentó un ajuste adecuado en ninguna de las tres temperaturas de estudio, 100, 120 y 140 °C, con coeficientes de determinación de 0.979, 0.977 y 0.975, respectivamente, esto debido a que solo se considera un término de la serie infinita de Crank.

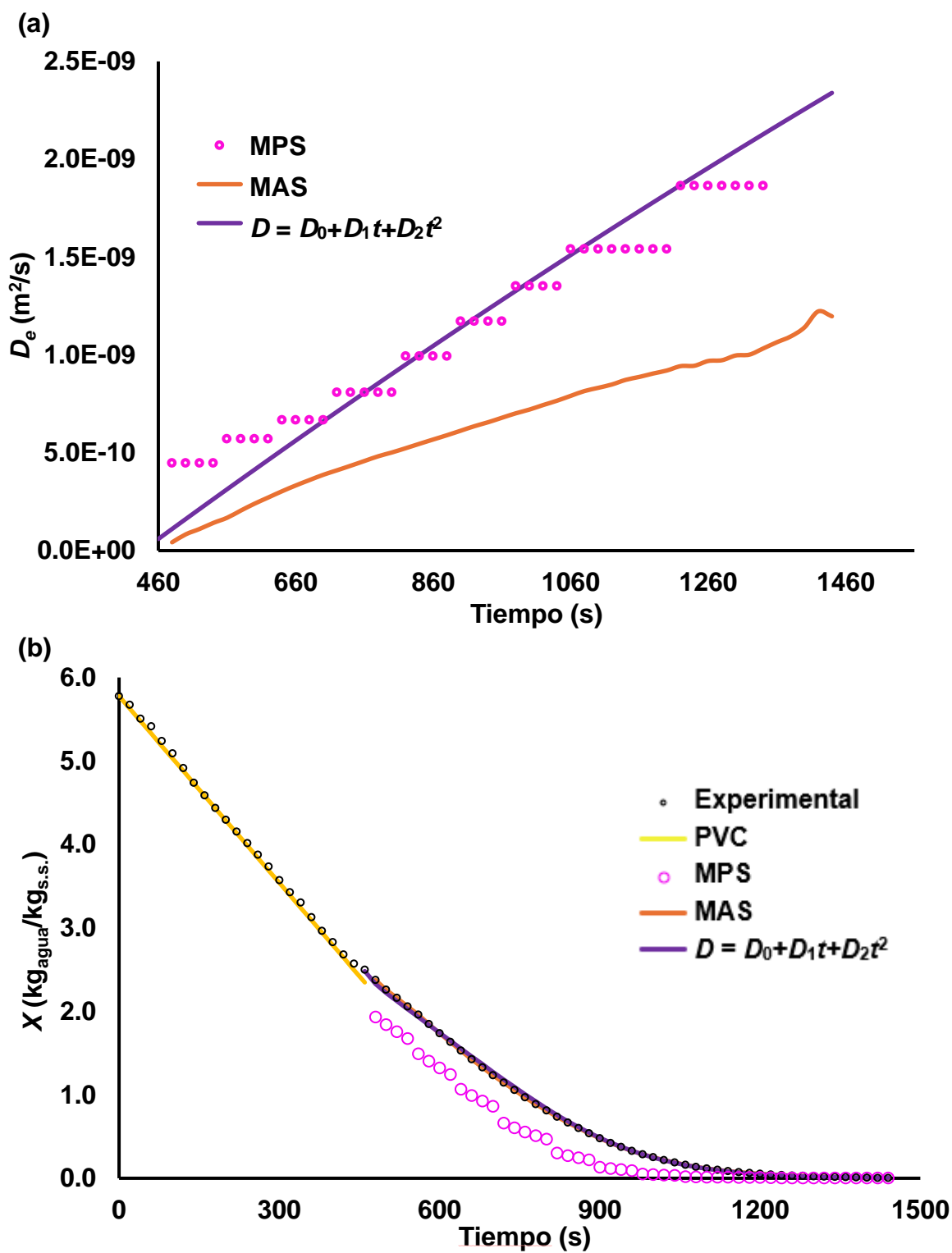


**Figura 17.** Gráficos de la (a) difusividad efectiva calculada con los diferentes métodos y de la (b) predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 100 °C.



**Figura 18.** Gráficos de la (a) difusividad efectiva calculada con los diferentes métodos y de la (b) predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 120 °C.





**Figura 19.** Gráficos de la (a) difusividad efectiva calculada con los diferentes métodos y de la (b) predicción del contenido de humedad en la cinética de horneado a 140 °C.

## **b Método de Aproximaciones Sucesivas (MAS)**

La difusividad efectiva calculada con el método de aproximaciones sucesivas y la predicción del contenido de humedad promedio para el periodo de velocidad decreciente de las cinéticas de horneado a 100, 120 y 140 °C, obtenidas con estas difusividades, se presentan en las **Figuras 17, 18 y 19**, respectivamente, se obtuvieron difusividades constantes con el método de aproximaciones sucesivas en los rangos de  $5.2 \times 10^{-12}$  a  $7.3 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para 100 °C,  $1.5 \times 10^{-11}$  a  $8.6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s a 120 °C y de  $4.2 \times 10^{-11}$  a  $1.2 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 140 °C. El comportamiento fue similar al método anterior, encontrando que la difusividad aumenta con la temperatura. Onwude y col (2018) obtuvieron difusividades constantes que van de  $5.28 \times 10^{-9}$  a  $7.03 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para rodajas de camote secado a temperaturas de 50 a 70 °C e indican que dicha respuesta estuvo afectada significativamente por la temperatura del proceso con difusividades más grandes al aumentar la temperatura de secado. Arrazola y col (2021) reportan difusividades entre  $4.26 \times 10^{-11}$  y  $9.83 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s para julianas de ñame fritas a temperaturas de 145, 165 y 185 °C, la cual muestra también un incremento con la temperatura, similar a lo observado en este estudio. Por su parte, Cazzaniga y col (2022) obtuvieron difusividades que van de  $1.0 \times 10^{-5}$  a  $1.5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s para botanas de yuca en rodajas horneadas a temperaturas de 190 a 235 °C. El aumento de la difusividad con la temperatura puede deberse a que se presenta una mayor presión de vapor en las muestras, lo que hace que la difusión de la humedad hacia la superficie aumente. Mientras que las variaciones en los resultados pueden estar influenciadas por la composición y la estructura del alimento, así como a la metodología empleada. Las difusividades obtenidas

permiten la predicción del contenido de humedad promedio en el periodo de velocidad decreciente, el cual mostró un ajuste adecuado con coeficiente de determinación de 0.999 en las tres temperaturas, 100, 120 y 140 °C. Asimismo, Onwude y col (2018) y Cazzaniga y col (2022) reportaron buenos ajustes, con coeficientes de determinación superiores a 0.97 y 0.96, respectivamente. Aunque, la predicción para el contenido de humedad promedio con este método fue satisfactoria, no se tiene la certeza de que sea adecuado, debido a que la difusividad parece aumentar indefinidamente sin alcanzar un límite, además, dicha predicción se basa en el cálculo del número de Fourier de masa a partir de la solución a la segunda ley de Fick, éste se sustituye en la misma para obtener los contenidos de humedad promedio, lo que genera un buen ajuste.

#### **4 Difusividad efectiva variable**

##### **a Difusividad Efectiva en Función del Tiempo al Cuadrado (FTC)**

Debido a que se observó que la difusividad no se comporta de manera constante durante el proceso de horneado, se calculó la difusividad efectiva variable en función del tiempo cuadrático y de la predicción del contenido de humedad promedio para el periodo de velocidad decreciente al emplear dichas difusividades en las cinéticas de horneado a 100, 120 y 140 °C, lo cual se observa en las **Figuras 17, 18 y 19**, respectivamente. Las difusividades se encontraron en el rango de  $4.4 \times 10^{-11}$  a  $1.3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para 100 °C,  $3.5 \times 10^{-11}$  a  $1.4 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 120 °C y de  $6.0 \times 10^{-11}$  a  $2.3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 140 °C. Se observó que la difusividad aumenta con la temperatura y el tiempo de proceso. Iribe-Salazar y col (2018) reportan una difusividad efectiva variable en función del tiempo cuadrático para tortillas de maíz hornadas a 180 °C

que van de  $4.30 \times 10^{-11}$  a  $1.38 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Sáez-Ceniceros (2019) estudió el secado de rodajas de pera a diferentes condiciones (temperatura y velocidad del aire) y encontró difusividades en rangos de  $2.83 \times 10^{-11}$  a  $1.26 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (70 °C, 1.5 m/s),  $5.94 \times 10^{-11}$  a  $1.68 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (62.9 °C, 1.2 m/s) y  $5.26 \times 10^{-11}$  a  $1.30 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (77 °C, 1.9 m/s) al considerarla variable en función del tiempo cuadrático. Mientras que, Pacheco-Plata y col (2024), al analizar la difusividad en función del tiempo cuadrático en rodajas de papa horneadas a 110, 120 y 130 °C, obtuvo rangos de  $4.34 \times 10^{-11}$  a  $1.96 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s,  $7.87 \times 10^{-11}$  a  $2.36 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s y  $5.48 \times 10^{-11}$  a  $2.70 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, respectivamente. Todos los autores confirman que la difusividad se comporta de manera variable dentro de los alimentos durante el tratamiento térmico y que ésta aumenta al incrementar la temperatura y el tiempo de proceso. Esto puede deberse a que al aumentar la temperatura se da un incremento de la energía cinética de las moléculas de agua, lo que facilita su movilidad en el interior del alimento, por lo que la difusividad se ve incrementada y disminuye la resistencia interna a la transferencia de masa (Sáez-Ceniceros 2019). Las diferencias en el orden de las difusividades se pueden atribuir a la composición y a la estructura del alimento, así como a las condiciones de temperatura y de tiempo empleadas por cada autor, ya que estos factores tienen influencia en formación de poros tanto en cantidad como en tamaño, que es parte de lo que determina la facilidad de la difusión de la humedad en la muestra. Con las difusividades obtenidas en función del tiempo cuadrático fue posible predecir satisfactoriamente el contenido de humedad promedio en el periodo de velocidad decreciente, con un coeficiente de determinación de 0.999 para las tres temperaturas de horneado (100, 120 y 140

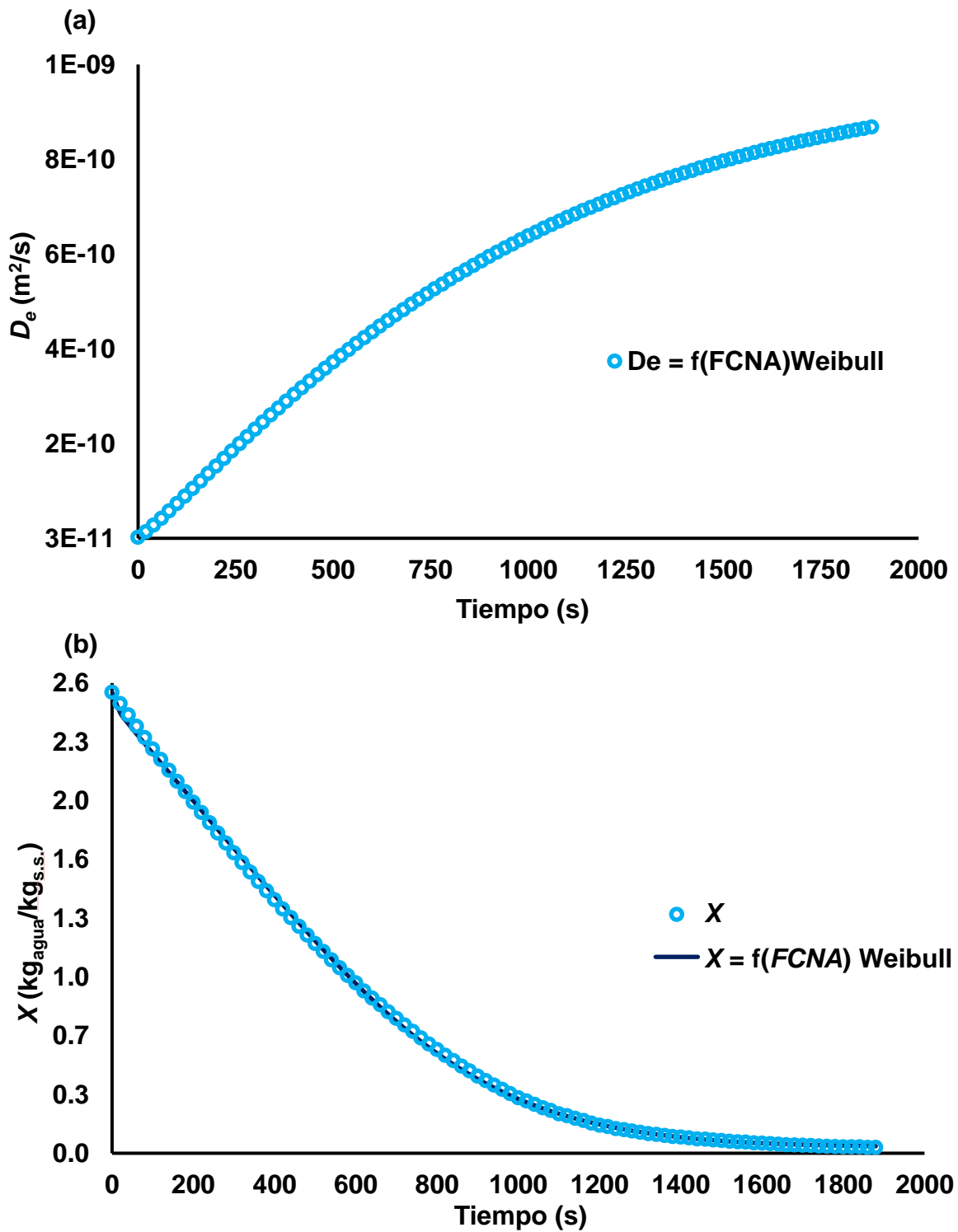
°C), por lo tanto, se considera que la difusividad muestra un comportamiento variable durante el horneado de las rodajas de camote.

## **F MODELADO DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA, CONTENIDO DE HUMEDAD Y FRACTURABILIDAD CON LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL**

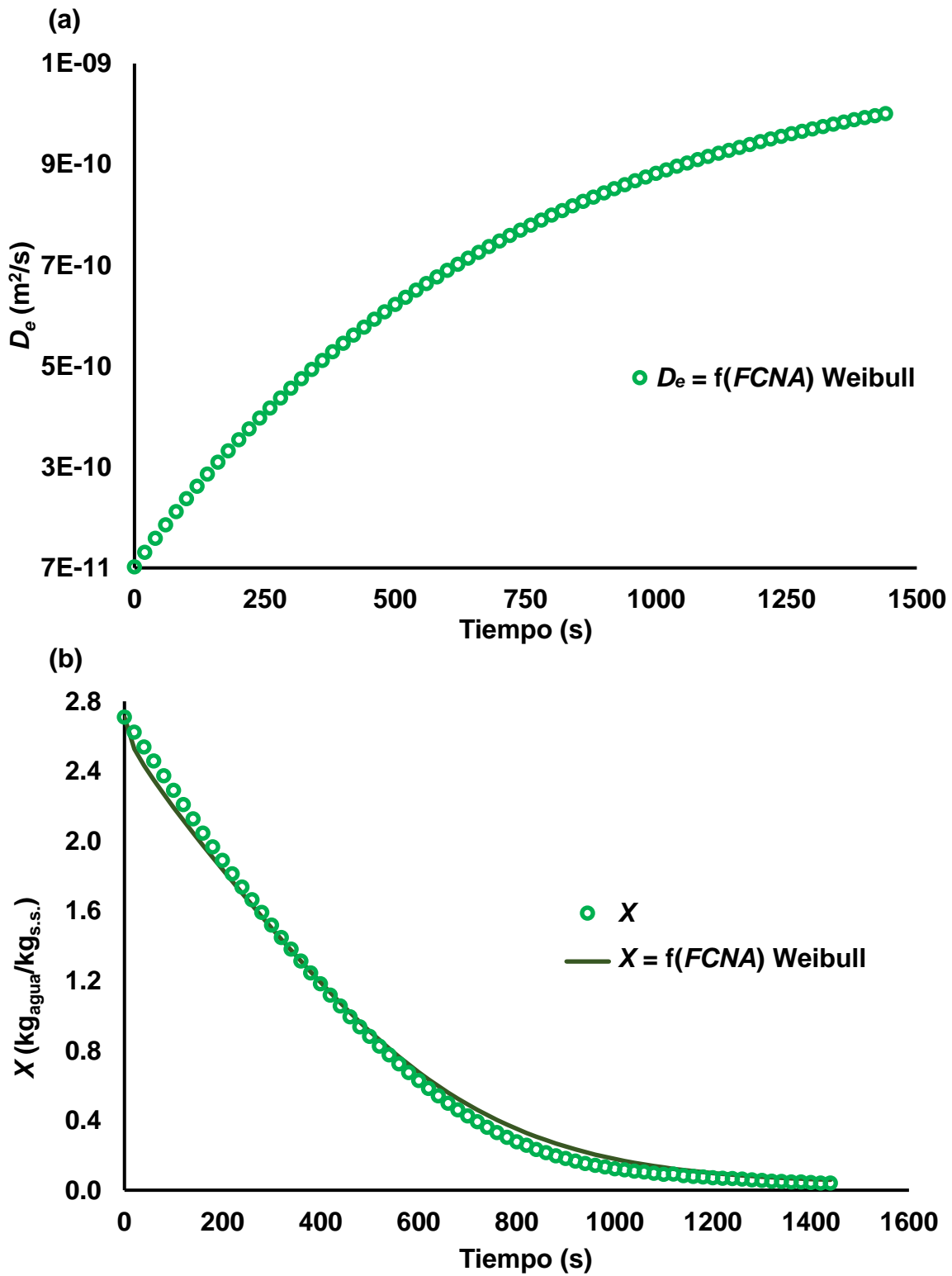
Las **Figuras 20a, 21a y 22a** muestran los gráficos de difusividad efectiva modelada en el periodo de velocidad decreciente con la distribución de Weibull, las cuales estuvieron en un rango de  $3.18 \times 10^{-11}$  a  $8.98 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $7.20 \times 10^{-11}$  a  $9.70 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y  $2.02 \times 10^{-11}$  a  $1.80 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para 100, 120 y 140 °C, respectivamente.

Se encontró que la difusividad se comporta de manera variable. Corzo y col (2008) reportan difusividad efectiva variable modelada con la distribución de Weibull que va de  $2.5 \times 10^{-12}$  a  $4.3 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s para rodajas de coroba secadas a temperaturas de 71 a 93 °C y velocidad de aire de 0.82 a 1.18 m/s. Asimismo, Iribes-Salazar y col (2018) indican difusividad variable durante el horneado de tortilla a 180 °C, la cual estuvo en un rango de  $1.08 \times 10^{-11}$  a  $1.30 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

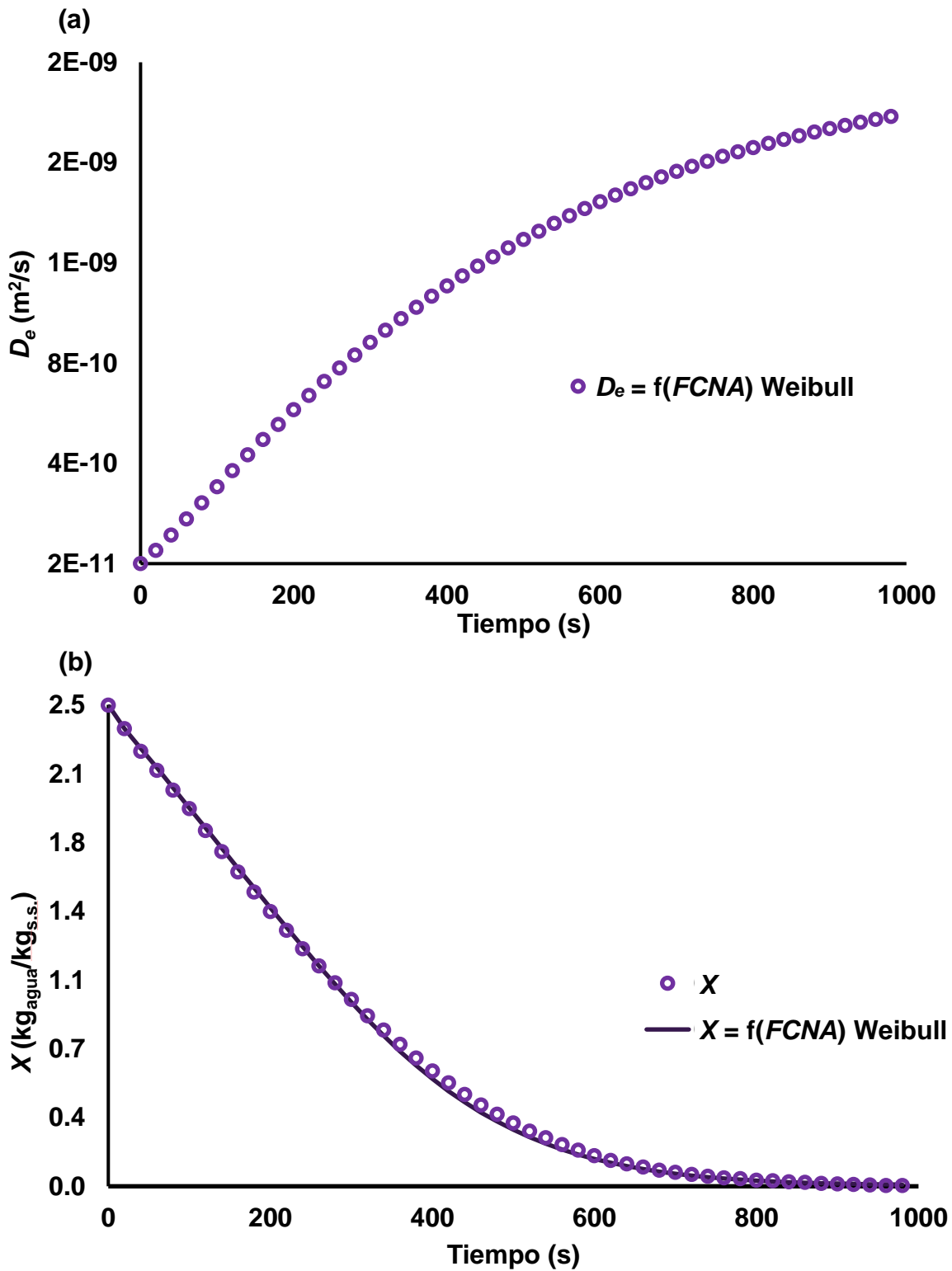
Las difusividades obtenidas con la distribución de Weibull se utilizaron para simular el contenido de humedad de las rodajas de camote horneadas a 100, 120 y 140 °C (**Figuras 20b, 21b y 22b**). En dichas figuras puede observarse que el modelo ajustó satisfactoriamente a las tres temperaturas de estudio con coeficientes de determinación de 0.999. Para llevar a cabo el modelado del contenido de humedad a diferentes temperaturas, se utilizaron los parámetros que se mencionan a continuación:



**Figura 20.** Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada en el período de velocidad decreciente con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos a 100 °C.



**Figura 21.** Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada en el período de velocidad decreciente con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos a 120 °C.



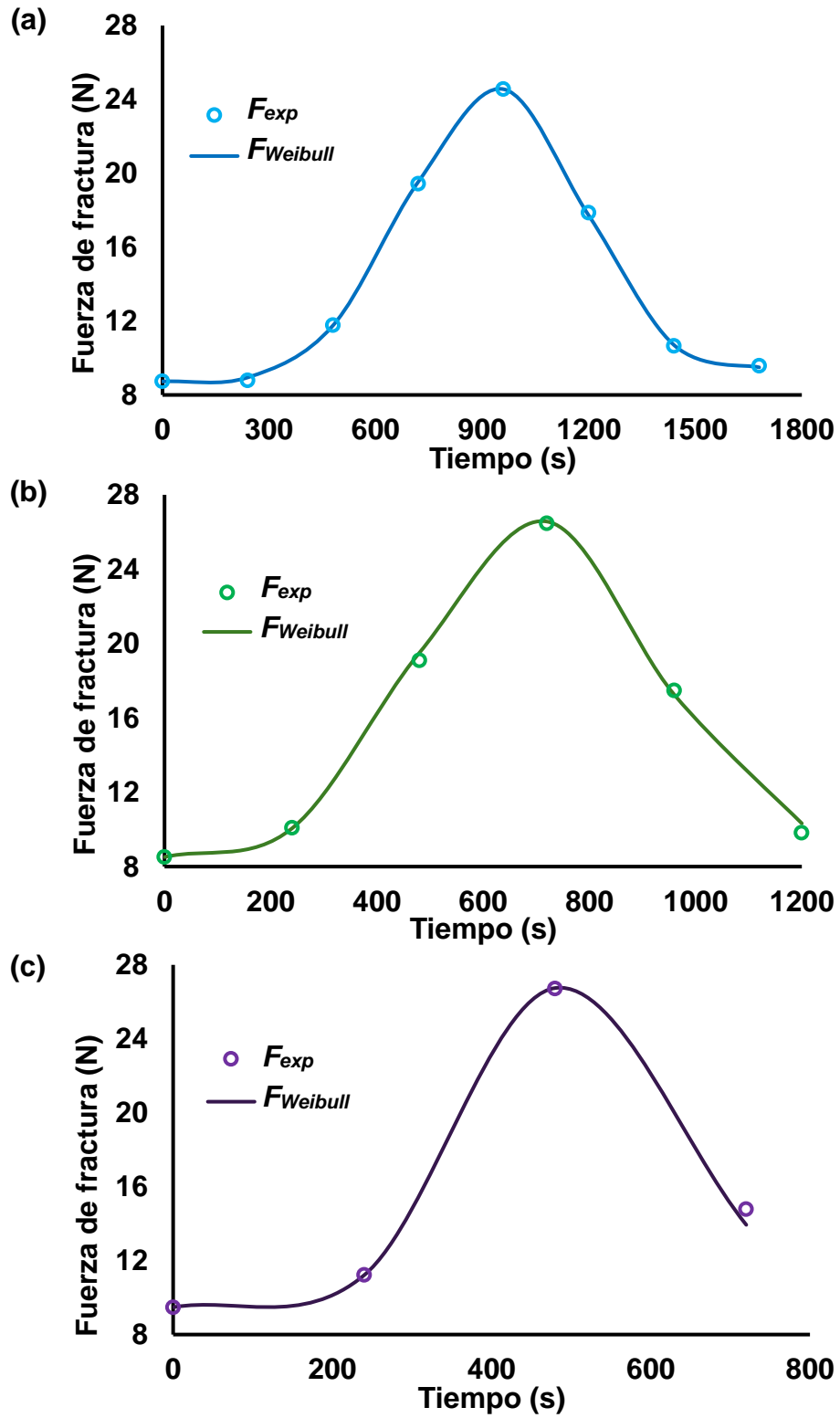
**Figura 22.** Gráficos de (a) difusividad efectiva modelada en el período de velocidad decreciente con la distribución de probabilidad de Weibull y (b) contenido de humedad modelado con dicha difusividad, ambos a 140 °C.



A 100 °C la difusividad inicial ( $D_0$ ) y de equilibrio ( $D_\infty$ ) consideradas fueron  $3.18 \times 10^{-11}$  y  $1.01 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, el parámetro de forma ( $\alpha$ ) para difusividad fue de 1.141 y el parámetro de escala de tiempo ( $\beta$ ) para difusividad resultó de 960 s, a 120 °C se trabajó con  $D_0 = 7.20 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s,  $D_\infty = 1.11 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s,  $\alpha = 1.0$  y  $\beta = 720$  s, mientras que a 140 °C se empleó  $D_0 = 2.02 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s,  $D_\infty = 2.01 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s,  $\alpha = 1.141$  y  $\beta = 480$  s.

Corzo y col (2008) obtuvieron un ajuste satisfactorio del contenido de humedad con coeficientes de determinación de 0.99, sugieren que el modelo de distribución de Weibull es sustituible para predecir el contenido de humedad de rodajas de coroba secadas a temperaturas de 71 a 93 °C y velocidades de aire de 0.82 a 1.18 m/s, con parámetros de forma que van de 1.06 a 1.21 y parámetro de escala de tiempo entre 41.8 y 71.5 min. Además, explican que el parámetro de escala de tiempo disminuye al aumentar la temperatura, ya que éste se relaciona con la velocidad del proceso y representa el tiempo necesario para completar el 63 % del proceso, aproximadamente. Iribe-Salazar y col (2018) reportan un ajuste adecuado del contenido de humedad de tortillas horneadas a 180 °C con un coeficiente de determinación de 0.999, al utilizar  $D_0 = 1.08 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s,  $D_\infty = 1.38 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s,  $\alpha = 1.074$  y  $\beta = 240$  s.

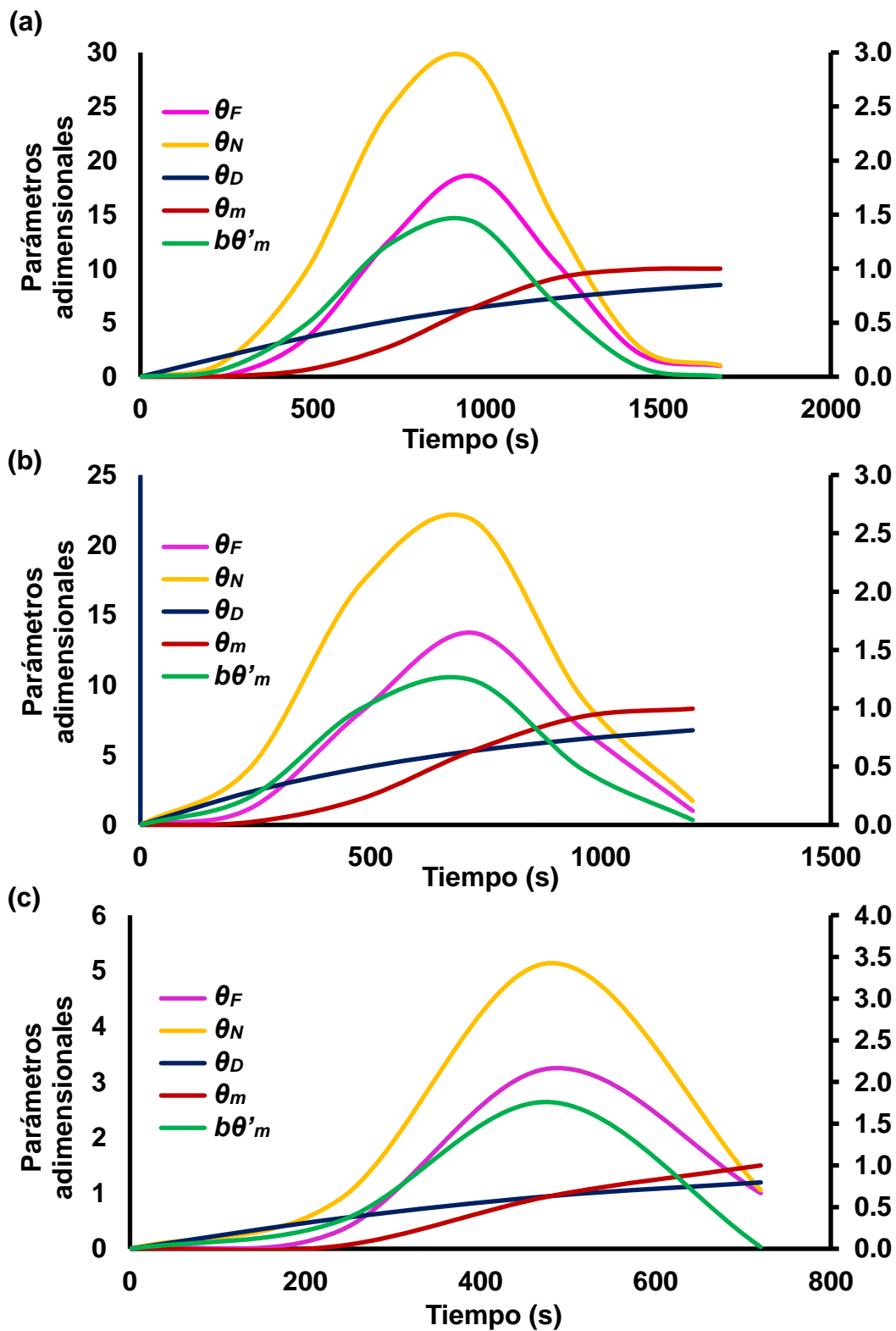
En las **Figuras 23a, 23b y 23c** se observa el ajuste de la fracturabilidad modelada con la distribución de Weibull para el periodo de velocidad decreciente respecto a la obtenida experimentalmente a 100, 120 y 140 °C, respectivamente.



**Figura 23.** Gráficos de la fuerza de fractura en el PVD modelada con la distribución de probabilidad de Weibull a (a) 100, (b) 120 y (c) 140 °C.

Para obtener dicho ajuste se utilizaron el parámetro de combinación lineal  $A$  de 19.97 (100 °C), 17.07 (120 °C) y 2.56 (140 °C), el parámetro de forma  $a$  para fracturabilidad fue de 3.91 (100 °C), 3.38 (120°C) y 4.78 (140 °C), mientras que el parámetro de escala  $b$  para fracturabilidad (relacionado con el tiempo) fue de 960, 720 y 480 s para 100, 120 y 140 °C, respectivamente. Los ajustes se consideraron adecuados ya que se obtuvieron coeficientes de determinación de 0.999 a 100 °C, 0.998 a 120 °C y 0.997 a 140 °C. Iribe-Salazar y col (2018) publicaron un ajuste adecuado de la fracturabilidad de tortillas horneadas a 180 °C con un coeficiente de determinación de 0.996, al emplear  $A = 2.785$ ,  $a = 3.327$  y  $b = 240$  s.

Se calcularon los parámetros de distribución del número de microporos no colapsables ( $\theta_m$ ), distribución del número de microporos colapsables ( $b\theta'_m$ ), distribución del número de microporos ( $\theta_N$ ), difusividad normalizada ( $\theta_D$ ) relacionada con el tamaño de los microporos y la fracturabilidad normalizada ( $\theta_F$ ) a 100, 120 y 140 °C, cuyo comportamiento respecto al tiempo se observa en las **Figuras 24a, 24b y 24c**, respectivamente. La distribución del número de microporos no colapsables,  $\theta_m$  aumentó lentamente seguido de un aumento pronunciado hasta estabilizarse, lo cual puede deberse a la presurización del contenido de humedad debido al cambio de estado del agua a vapor, lo que favorece la formación de más microporos hasta que estos se interconectan entre sí. La distribución del número de microporos colapsables,  $b\theta'_m$  aumenta hasta llegar a un máximo y posteriormente disminuye, esto puede atribuirse a que se da una presurización y despresurización, la cual está ligada a la formación y destrucción de microporos inestables.

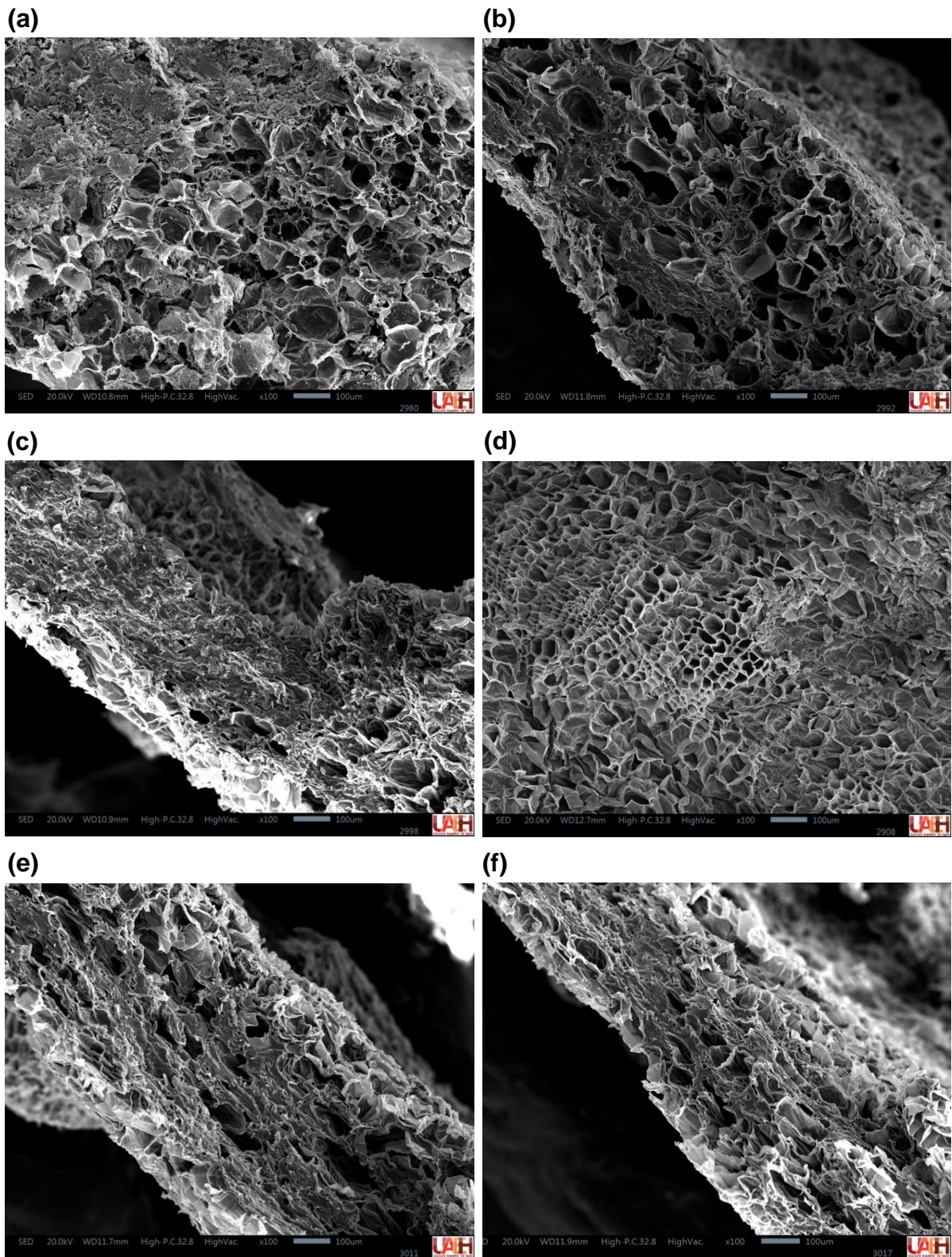


**Figura 24.** Gráficos de los parámetros normalizados utilizados para el modelado de la fuerza de fractura con la distribución de probabilidad de Weibull a (a) 100, (b) 120 y (c) 140 °C. La difusividad normalizada ( $\theta_D$ ), número de microporos no colapsables ( $\theta_m$ ) y colapsables ( $b\theta'_m$ ) se graficaron en el eje vertical secundario.

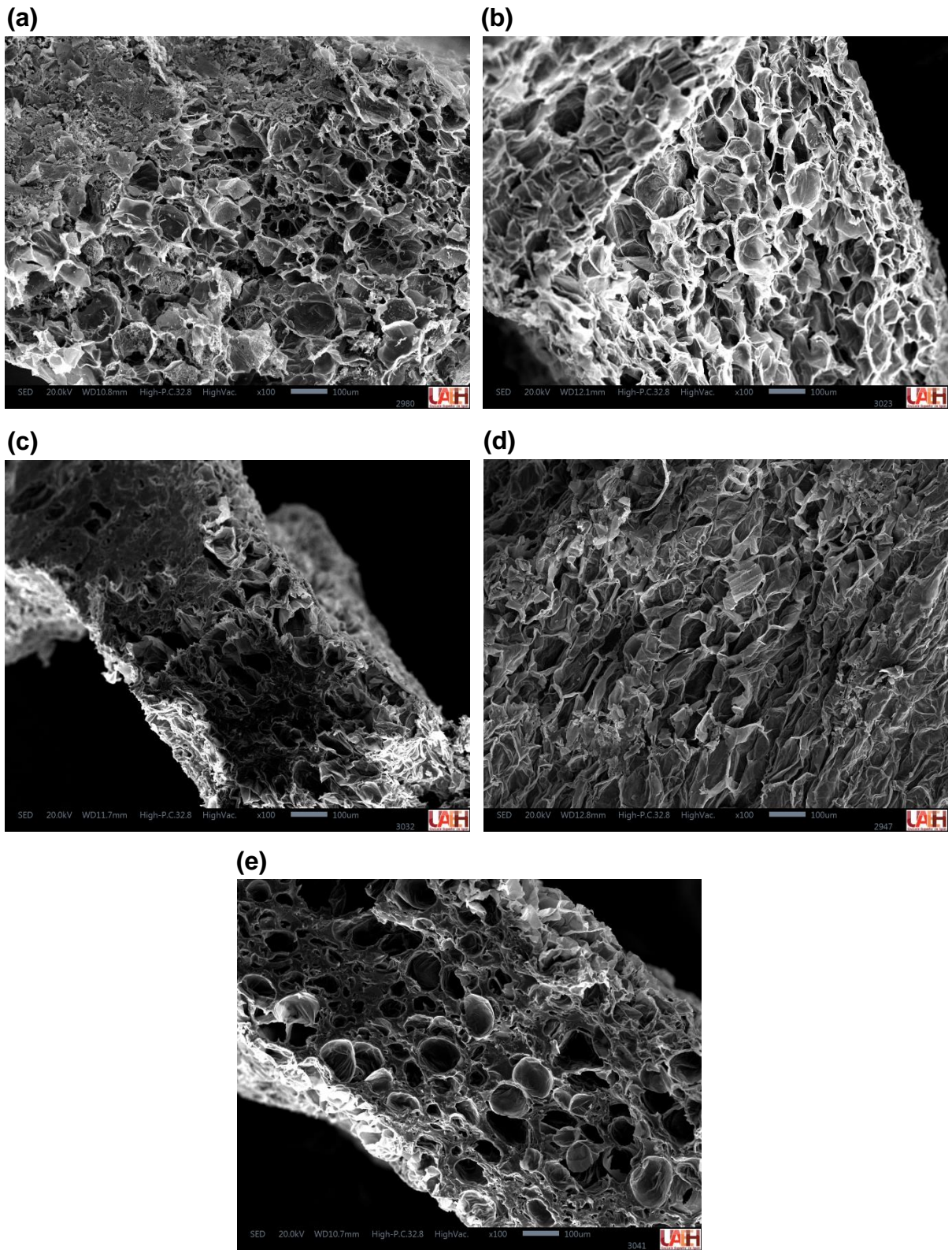
Estas dos distribuciones contribuyen a la distribución del número de microporos  $\theta_N$ , la cual indica que el número de poros crece rápidamente hasta un máximo y luego disminuye. La difusividad normalizada  $\theta_D$ , que está relacionada con el tamaño de los poros, mostró un aumento hasta estabilizarse. Mientras que la fracturabilidad normalizada  $\theta_F$ , que está afectada por la difusividad normalizada  $\theta_D$  y la distribución del número de poros  $\theta_N$ , presenta un aumento hasta alcanzar un máximo, seguido de un declive.

Este comportamiento puede deberse a la formación de una estructura esponjosa, ya que primeramente se aumenta el número de microporos por evaporación, después se llega a un máximo, donde hay demasiados microporos que no han comenzado a colapsar y posteriormente se da una pérdida de estos microporos por la disminución en la rapidez de eliminación de agua, lo que causa el colapso de las paredes celulares y el alargamiento de las grietas.

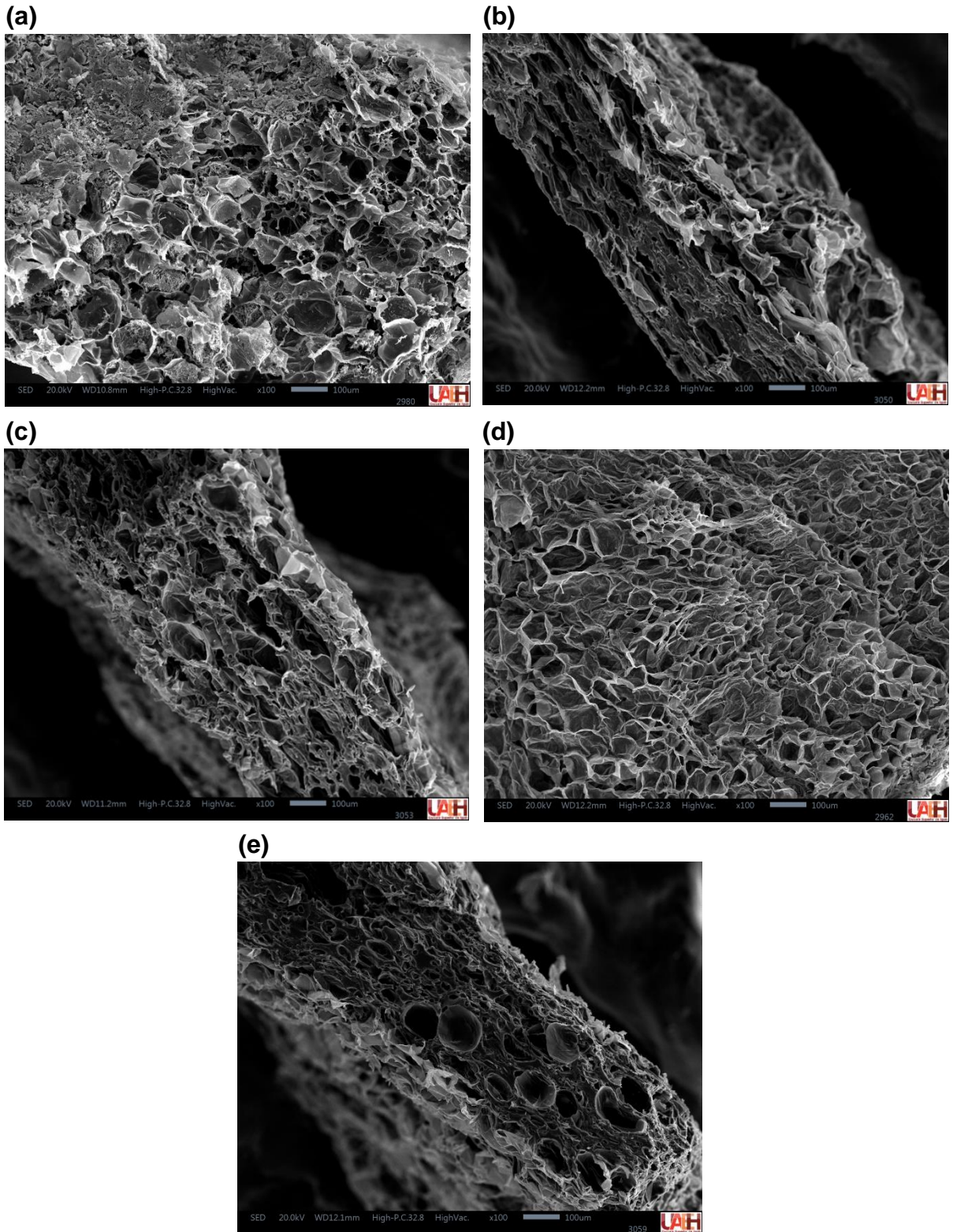
Lo explicado anteriormente puede corroborarse con los cambios físicos que se observan en las **Figuras 25, 26 y 27**, las cuales muestran microfotografías de la parte transversal de las rodajas de camote horneadas a 100, 120 y 140 °C, respectivamente, a diferentes tiempos del proceso de horneado. En las rodajas horneadas a 100 °C (**Figura 25**) es posible visualizar que, al inicio del proceso, 0 min (**Figura 25a**), los poros no se encuentran en toda la superficie de la rodaja ( $\theta_N$  es bajo); al pasar el tiempo de horneado, 16 min (**Figuras 25b y 25c**), se aprecia primeramente un aumento en el número de poros ( $\theta_N$ ,  $\theta_m$  y  $b\theta'_m$  aumentan) y como estos van aumentando su tamaño y comienzan a interconectarse ( $\theta_D$  aumenta);



**Figura 25.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 100 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 16, (c) 28, (d) 28 (vista longitudinal), (e) 40 y (f) 46 min.



**Figura 26.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 120 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 8, (c) 20, (d) 20 (vista longitudinal) y (e) 32 min.



**Figura 27.** Imágenes capturadas con microscopio electrónico de barrido de la vista transversal de rodajas de camote horneadas a 140 °C durante (a) 0 (escaldado), (b) 12, (c) 16, (d) 16 (vista longitudinal) y (e) 24 min.



A los 28 min de horneado (**Figura 25d**), que es el tiempo al que corresponde la fuerza máxima de fractura más alta (100 °C), se observa que el número de poros es mayor ( $\theta_N$ ,  $\theta_m$  y  $b\theta'_m$  llegaron a un máximo) y que toda la superficie de la rodaja estaba repleta de poros de diferentes tamaños, ya que se está presentando la formación de microporos y a pesar de que el número de microporos colapsables es elevado, los microporos no colapsables que ya existían también aumentaron en número y tamaño ( $\theta_D$  mayor), por lo cual se requiere más fuerza para quebrar la botana de camote ( $\theta_F$  máxima).

Después de dicho punto, a los 40 min de horneado (**Figura 25e**) se aprecian menos poros y estos son de mayor tamaño ( $\theta_N$  comienza a disminuir y  $\theta_D$  sigue aumentando), lo que hace que la fuerza requerida para romperlos sea menor ( $\theta_F$  disminuye), debido a que se está eliminando la humedad y la porosidad está incrementando; hasta que al final del horneado, 46 min (**Figura 25f**), la mayoría de los poros colapsables ha colapsado ( $b\theta'_m$  disminuyó) y se tiene un menor número de poros ( $\theta_N$  disminuyó), que son los poros que no colapsaron y que ya se estabilizaron ( $\theta_m$  se mantiene constante) y son relativamente grandes ( $\theta_D$  máxima), por lo que, son fáciles de atravesar, lo cual hace que la botana final requiera una fuerza máxima de fractura pequeña para romperse ( $\theta_F$  disminuyó). Se observó el mismo comportamiento físico en las microfotografías de las rodajas de camote horneadas a 120 y 140 °C, en las que el tiempo al que se obtuvo la mayor fuerza máxima de fractura fueron a los 16 min (**Figura 26d**) y 12 min (**Figura 27c**), respectivamente.

## VIII CONCLUSIONES

Se obtuvieron botanas de camote horneadas con fuerza máxima de fractura que les confiere crujibilidad al disminuir el contenido de humedad y la actividad de agua. Además, la reducción en las reacciones de oscurecimiento, atribuible a la disminución de la actividad agua, resultó en cambios de color mínimos.

A la temperatura más alta estudiada, se logró una retención significativa de ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales, lo que contribuye a la conservación de sus características bioactivas y a la aceptación por parte de los consumidores.

Las cinéticas de contenido de humedad, fuerza de fractura, actividad de agua, diferencia total de color, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides totales proveen perspectivas acerca del proceso de horneado. Estas cinéticas enfatizan la naturaleza dinámica de las transformaciones fisicoquímicas y bioactivas durante el horneado, proporcionando información importante para la industria alimentaria y la aceptación del consumidor.

Las microfotografías capturadas de las rodajas de camote fresco presentaron una estructura celular poligonal con gránulos de almidón visibles, mientras que se mostraron modificaciones evidentes en la composición y en la estructura celular de las rodajas de camote horneado debido al efecto de la temperatura y del tiempo de proceso.

En los espectros FTIR se encontraron señales para los mismos grupos funcionales en camote fresco, escaldado y horneado. La diferencia se observó en

la transmitancia de dichas señales, lo que puede deberse a cambios en la conformación o en el rompimiento de enlaces de los grupos en cuestión, por efecto de la temperatura y del tiempo de proceso.

El análisis de los parámetros de difusión ( $X_0$ ,  $X_c$ ,  $X_\infty$ ,  $N_c$ ,  $k_V$  y  $D_e$ ) permitió predecir el contenido de humedad promedio en las cinéticas de horneado a las diferentes temperaturas. Esas predicciones se estimaron adecuadamente para el periodo de velocidad constante ( $R^2 = 0.999$ ), mientras que, en el caso del periodo de velocidad decreciente, la mejor estimación se obtuvo con la difusividad en función del tiempo al cuadrado ( $R^2 = 0.999$ ). Por lo que este estudio permitirá estimar de manera adecuada los parámetros de transferencia de masa en alimentos horneados que se puedan representar como placa infinita.

La simulación realizada con el modelo probabilístico de Weibull para el contenido de humedad promedio y la fracturabilidad en el periodo de velocidad decreciente resultó adecuado en las temperaturas de horneado estudiadas ( $R^2 = 0.999$  para  $\bar{X}$  y  $R^2 \geq 0.997$  para  $F$ ) al utilizar los parámetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $A$ ,  $a$  y  $b$ ) adecuados para cada temperatura. Esto permitirá realizar predicciones del comportamiento de la difusividad, el contenido de humedad promedio y la fracturabilidad en botanas, reduciendo la experimentación.

Los cambios físicos explicados teóricamente con el comportamiento de la fracturabilidad experimental y la simulada con el modelo probabilístico de Weibull, fueron demostrados experimentalmente con las microfotografías capturadas a diferentes tiempos de horneado con el microscopio electrónico de barrido, con las

cuales se corroboraron los cambios físicos que ocurren en las rodajas de camote durante el proceso.

Este estudio proporciona información valiosa sobre las alteraciones de las variables fisicoquímicas, los compuestos bioactivos y los parámetros difusivos durante el horneado de las botanas de camote. Los resultados contribuyen a comprender el impacto de la temperatura en los atributos de calidad y nutricional, así como el comportamiento difusivo durante el horneado de estas botanas, un aspecto crítico tanto para la industria alimentaria como para la aceptación del consumidor.

## IX BIBLIOGRAFÍA

- Aina AJ, Falade KO, Akingbala JO, Titus P. 2009. Physicochemical properties of twenty-one Caribbean sweet potato cultivars. *International Journal of Food Science and Technology* 44(9):1696-1704.
- Alam MK. 2021. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam): Revisiting the associated health benefits. *Trends in Food Science and Technology* 115:512-529.
- Alam MK, Rana ZH, Islam SN. 2016. Comparison of the proximate composition, total carotenoids and total polyphenol content of nine orange-fleshed sweet potato varieties grown in Bangladesh. *Foods* 5(3):64.
- Alam MK, Sams S, Rana ZH, Akhtaruzzaman M, Islam SN. 2020. Minerals, vitamin C, and effect of thermal processing on carotenoids composition in nine varieties orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* 92:103582.
- Anwar NZR, Ghani AA. 2019. Effect of Different Processing Methods on the Physicochemical Properties and Sensory Evaluations of Sweet Potatoes Chips. *Journal of Agrobiotechnology* 10(2):51-63.
- AOAC Official Methods of Analysis. 2012. Of AOAC INTERNATIONAL. 18<sup>a</sup> ed. Estados Unidos de América: Association of Official Analytical Chemists.
- Arrazola G, Alvis A, Romero P. 2021. Determination of the diffusion coefficient through oil absorption and moisture loss, such as the porosity of pieces of yam (*Dioscorea rotundata*) during deep fat frying. *Heliyon* 7(9):e08036.

- Asfaw DE. 2022. Antioxidant Properties of Phenolic Compounds to Manage Oxidative Stress—A Review. *Journal of Advances in Agronomy and Crop Science* 2(103):1-16.
- Avula RY. 2005. Rheological and functional properties of potato and sweet potato flour and evaluation of its application in some selected food products [Tesis de Doctorado]. Mysore, India: Universidad de Mysore. 141p.
- Barba AIO, Hurtado MC, Mata MCS, Ruiz VF, Tejada MLS. 2006. Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and  $\beta$ -carotene in vegetables. *Food Chemistry* 95(2):328-336.
- Barbosa-Cánovas GV, Fontana JAJ, Schmidt SJ, Labuza TP. 2020. *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. John Wiley and Sons.
- Basilio-Cortés U, González-Cruz L, Velázquez G, Teniente-Martínez G, Gómez-Aldapa C, Castro-Rosas J, Bernardino-Nicanor A. 2019. Effect of dual modification on the spectroscopic, calorimetric, viscosimetric and morphological characteristics of corn starch. *Polymers* 11(2):333-346.
- Basurto F, Martínez D, Rodríguez T, Evangelista V, Mendoza M, Castro D, Gonzáles JC, Vaylón V. 2015. Conocimiento actual de cultivo de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en México. *AgroProductividad* 8:30-34.
- Caetano PK, Mariano-Nasser FADC, Mendonça VZD, Furlaneto KA, Daiuto ER, Vieites RL. 2017. Physicochemical and sensory characteristics of sweet potato chips undergoing different cooking methods. *Food Science and Technology* 38:434-440.

- Canahualpa-Carhuamaca F, Solano-Gómez E. 2018. Estudio de la cinética de secado y degradación de las antocianinas y vitamina c de la mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) [Tesis de Licenciatura]. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú. 91p.
- Cazzaniga A, Brousse MM, Linares AR. 2022. Kinetics of moisture loss applied to the baking of snacks with pregelatinized cassava starch. *Journal of Food Science* 87(6):2651-2662.
- Chacón-Villalobos A, Reyes-Cruz Y. 2009. Efecto del empaque sobre la textura y el color del camote (*Ipomoea batatas* L.) durante el proceso de "curado". *Agronomía Mesoamericana* 20(1):47-57.
- Chan CF, Chiang CM, Lai YC, Huang CL, Kao SC, Liao WC. 2012. Changes in sugar composition during baking and their effects on sensory attributes of baked sweet potatoes. *Journal of Food Science and Technology* 51(12):4072-4077.
- Chica-Barco V. 2022. Secado de granos de cacao (variedad TCS01) y su efecto sobre la concentración de compuestos fenólicos, azúcares y ácidos orgánicos [Tesis de Doctorado]. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 141p.
- Chiva-Blanch G, Badimon L. 2017. Effects of polyphenol intake on metabolic syndrome: current evidence from human trials. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2017(1):5812401.
- Cobeña G, Cañarte E, Mendoza A, Cárdenas F, Guzmán A. 2017. Manual técnico del cultivo de camote. 106. Ecuador. Hums. 88p.

- CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2009. Disponible de: <http://www.conabio.gob.mx/>. Consultado: junio de 2020.
- Corzo O, Bracho N, Pereira A, Vásquez A. 2008. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Food Science and Technology* 41(10):2023-2028.
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2<sup>a</sup> ed. Clarendon Press, Oxford.
- Cui R, Zhu F. 2019. Physicochemical properties and bioactive compounds of different varieties of sweetpotato flour treated with high hydrostatic pressure. *Food chemistry* 299:125129.
- Dako E, Retta N, Desse G. 2016. Comparison of three sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) varieties on nutritional and anti-nutritional factors. *Global Journal of Science Frontier Research: D Agriculture and Veterinary* 16(4):1-11.
- Damiano-Vásquez B. 2019. Influencia de la temperatura en la velocidad de reacción de degradación del ácido ascórbico y  $\beta$ -caroteno durante el secado convectivo del aguaymanto (*physalis peruviana* L.) cultivado en la unidad vecinal de Chumbibamba [Tesis de Licenciatura]. Apurímac, Perú: Universidad Nacional José María Arguedas. 113p.
- De Souza AG, Viana DJS, Santos ASD, Andrade VCD, Rosa DDS. 2020. Structure and properties of starch and flour of four Brazilian sweet potatoes (*Ipomoea batatas*) cultivars. *Matéria* 25(03):e-12828.
- Dincer C, Karaoglan M, Erden F, Tetik N, Topuz A, Ozdemir F. 2011. Effects of baking and boiling on the nutritional and antioxidant properties of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivars. *Plant Foods for Human Nutrition* 66:341-347.



- Dovene AK, Wang L, Bokhary SUF, Madebo MP, Zheng Y, Jin P. 2019. Effect of cutting styles on quality and antioxidant activity of stored fresh-cut sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) cultivars. *Foods* 8(12):674.
- Duvivier P, Hsieh PC, Lai PY, Charle AL. 2010. Retention of phenolics, carotenoids, and antioxidant activity in the Taiwanese sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) CV tainong 66 subjected to different drying conditions. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 10(11):4413-4429.
- Ejiofor J, Onyeso B. 2019. Effect of processing methods on the physicochemical, mineral, and carotene content of oranges fleshed sweet potato. *Journal of Food Research* 8:50-58.
- Escobar-Puentes AA, Palomo I, Rodríguez L, Fuentes E, Villegas-Ochoa MA, González-Aguilar GA, Wall-Medrano A. 2022. Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) phenotypes: Agroindustry to Health Effects. *Foods* 11(7):1058.
- Feitoza TG, de Lima Ponciano Costa B, Sampaio KB, dos Santos Lima M, Garcia EF, de Albuquerque TMR, Rodrigues NPA. 2023. An In Vitro Study of the Impacts of Sweet Potato Chips with Potentially Probiotic *Levilactobacillus brevis* and *Lactiplantibacillus plantarum* on Human Intestinal Microbiota: Impacts of potato chips with probiotics on intestinal microbiota. *Probiotics and Antimicrobial Proteins* 1:1-12.
- Fellows F. 2017. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 4<sup>a</sup> edición. Inglaterra. CRC Press. 575p.

- Fitch-Vargas PR. 2019. Obtención y caracterización de biocompuestos a partir de una mezcla de almidón de maíz y fibra de bagazo de caña acetilados [Tesis de Doctorado]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 230p.
- Gasa S, Sibanda S, Workneh TS, Laing M, Kassim A. 2022. Thin-layer modelling of sweet potato slices drying under naturally-ventilated warm air by solar-venturi dryer. *Heliyon* 8(2):e08949.
- Geankoplis CJ. 2013. Procesos de transporte y operaciones unitarias. 4ª edición. México. CECSA. 1034p.
- Goncalves EM, Pereira N, Silva M, Alvarenga N, Ramos AC, Alegria C, Abreu M. 2023. Influence of air-drying conditions on quality, bioactive composition and sensorial attributes of sweet potato chips. *Foods* 12(6):1198.
- Herrera-Jácome KV. 2015. Elaboración de rodajas de camote (*Ipomoea batatas*) aplicando fritura al vacío [Tesis de Licenciatura]. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial. 82 p.
- INIA Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 2017. Disponible de: <http://www.iniap.gob.ec/>. Consultado: junio de 2020.
- Iribe-Salazar R, Caro-Corrales J, Hernández-Calderón O, Zazueta-Niebla J, Gutiérrez-Dorado R, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y. 2015. Heat transfer during blanching and hydrocooling of broccoli florets. *Journal of Food Science* 80(12):E2774-E2781.

- Iribe-Salazar R, Gutiérrez-Dorado R, Ríos-Iribe E, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y, Hernández-Calderón O, Caro-Corrales J. 2018. Modeling of Effective Moisture Diffusivity in Corn Tortilla Baking. *Journal of Food Science* 83(8):2167–2175.
- Islam S, Kumar A, Dash K, Alom S. 2018. Physicochemical analysis and nutritional properties of fresh, osmo-dehydrated and dried chayote (*Sechium edule* L.). *Journal of Postharvest Technology* 6(2):49-56.
- Janve B, Yang W, Sims Ch. 2015. Sensory and quality evaluation of traditional compared with power ultrasound processed corn (*Zea Mays*) tortilla chips. *Journal of Food Science* 80(6):S1368-S1376.
- Jha AK, Sit N. 2020. Drying characteristics and kinetics of colour change and degradation of phytochemicals and antioxidant activity during convective drying of deseeded *Terminalia chebula* fruit. *Journal of Food Measurement and Characterization* 14:2067-2077.
- Johnson JB, Budd C, Mani JS, Brown P, Walsh KB, Naiker M. 2022. Carotenoids, ascorbic acid and total phenolic content in the root tissue from five Australian-grown sweet potato cultivars. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 50(1):32-47.
- Junqueira JRJ, Corrêa JG, Mendoca KSD. 2016. Evaluation of the shrinkage effect on the modeling kinetics of osmotic dehydration of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.)). *Journal of Food Processing and Preservation* 41(3):e12881.
- Kourouma V, Mu TH, Zhang M, Sun HN. 2020. Comparative study on chemical composition, polyphenols, flavonoids, carotenoids, and antioxidant activities of

various cultivars of sweet potato. *International Journal of Food Science and Technology* 55(1):369-378.

Leandro-Laguna C. 2021. Cinética de degradación térmica del ácido ascórbico y antocianinas en la pulpa de camu camu (*Myrciaria dubia*) durante la pasteurización [Tesis de Maestría]. Tingo María, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva. 73p.

Lim TK. 2016. *Edible medicinal and non-medicinal plants*. 1. Dordrecht, The Netherlands: Springer. 285-292p.

Mera-Campos JA. 2022. Efecto del tiempo y temperatura de pasteurización en cinética de degradación de fenoles en el zumo de mora (*Rubus Ulmifolius*) [Tesis de Licenciatura]. Pimentel, Perú: Universidad Señor de Sipán. 61p.

Mohd-Nawi N, Muhamad II, Mohd-Marsin A. 2015. The physicochemical properties of microwave-assisted encapsulated anthocyanins from *Ipomoea batatas* as affected by different wall materials. *Food Science and Nutrition* 3(2):91-99.

Moncada LM, Gualdrón L. 2006. Retención de nutrientes en la cocción, freído y horneado de tres alimentos energéticos. *Revista de investigación* 6:179-187.

Monteiro RL, de Moraes JO, Domingos JD, Carciofi BA, Laurindo JB. 2020. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 63:102317.

Monteiro RL, de Moraes JO, Gomide AI, Carciofi BAM, Laurindo JB. 2022. Temperature control for high-quality oil-free sweet potato CHIPS produced by microwave rotary drying under vacuum. *LWT* 157:113047.

- Montgomery DC, Jaime DS. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Moo-Huchin V, Estrada-Mota I, Estrada-León R, Cuevas-Glory L, Ortiz-Vázquez E, Vargas y Vargas ML, Betancur-Ancona D, Sauri-Duch E. 2014. Determination of some physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of tropical fruits from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry* 152: 508-515.
- Musilova J, Lidikova J, Vollmannova A, Frankova H, Urminska D, Bojnanska T, Toth T. 2020. Influence of heat treatments on the content of bioactive substances and antioxidant properties of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) tubers. *Journal of Food Quality*. 1-10.
- Nakagawa S, Ohmura R, Toshima S, Park H, Narasako Y, Hirano T, Otano M, Kunitake H. 2021. Changes in polyphenols, anthocyanins, and DPPH radical-scavenging activities in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during tuber growth. *Scientia Horticulturae* 284:110100.
- Naz S, Raza SA, Khan ZA, Mansha A, Ahmad M, Zahoor AF, Hussain Z. 2017. Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of peel and Pulp extracts of red and White varieties of *Ipomoea batatas* (L.) Lam. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* 16(9):2221-2229.
- Neela S, Fanta SW. 2019. Review on nutritional composition of orange-fleshed sweet potato and its role in management of vitamin A deficiency. *Food Science and Nutrition* 7:1920-1945.

- Nicanuru C, Laswai HS, Sila DN. 2015. Effect of sun- drying on nutrient content of orange fleshed sweet potato tubers in Tanzania. *Sky Journal of Food Science* 4(7):91–101.
- Nieto C. 2014. Técnicas de cocción: sabor, color, textura y nutrientes a buen recaudo. *Farmacia profesional*. ELSEVIER. 28:15-19.
- Ogliari R, Soares JM, Teixeira F, Schwarz K, Aparecida da Silva K, Schiessel DL, Novello D. 2020. Chemical, nutritional, and sensory characterization of sweet potato submitted to different cooking methods. *International Journal of Research Granthaalayah* 8(10):147-156.
- Oliveira AF, Soares JM, da Silva ÉC, Loubet-Filho PS, Candido CJ, do Amaral LA, Novello D. 2019. Evaluation of the chemical, physical and nutritional composition and sensory acceptability of different sweet potato cultivars. *Semina: Ciências Agrárias* 40(3):1127-1138.
- Oluwole OB, Kosoko SB, Owolabi SO, Olatope SOA, Alagbe GO, Ogunil OA, Jegede AA, Elemo GN. 2014. Effect of baking temperature on the quality of baked sweet potato crisps. *British Journal of Applied Science and Technology* 4(23):3419-3429.
- Onwude DI, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G. 2018. Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. *Journal of Food Process Engineering* 41(4):E12686-E12697.
- Ooko-Abong' G, Muzhingi T, Wandayi-Okoth M, Ng'ang'a F, Ochieng' PE, Mahuga-Mbogo D, Malavi D, Akhwale M, Ghimire S. 2020. Phytochemicals in leaves and roots of

selected Kenyan orange fleshed sweet potato (OFSP) varieties. International Journal of Food Science 2020(1):3567972.

Orellana-Martínez BA. 2018. Evaluación en adaptabilidad y rendimiento de 8 variedades de camote (*Ipomoea batata* L.), durante la época lluviosa, comunidad La Pimienta, Yoro, Yoro [Tesis de Licenciatura]. Atlántida, Honduras: Universidad Nacional Autónoma de Honduras. 28p.

Ouyang M, Cao S, Huang Y, Wang Y. 2021. Phenolics and ascorbic acid in pumpkin (*Cucurbita maxima*) slices: effects of hot air drying and degradation kinetics. Journal of Food Measurement and Characterization 15:247-255.

Pacheco-Plata F, Gutiérrez-Dorado R, Iribe-Salazar R, Carrasco-Escalante M, Caro-Hernández O, Camacho-Hernández L, Vázquez-López Y, Cronin K, Caro-Corrales J. 2024. Modeling of moisture content during baking with different approaches for effective diffusivity and evaluation of quality variables in baked potato slices. Journal of Food Science 89(9):5763-5773.

Pazos J, Zema P, Corbino GB, Gabilondo J, Borioni R, Malec LS. 2022. Growing location and root maturity impact on the phenolic compounds, antioxidant activity and nutritional profile of different sweet potato genotypes. Food Chemistry: Molecular Sciences 5:100125.

Pellegrini-Zurita JD. 2017. Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando microondas [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 118p.

- Phomkaivon N, Surojanametakul V, Satmalee P, Poolperm N, Dangpium N. 2018. Thai purple sweet potato flours: characteristic and application on puffed starch-based snacks. *Journal of Agricultural Science* 10(11):171-184.
- Puma-Eugenio Y. 2023. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante del zumo de tuna (*Opuntia-ficus indica*) en tres ecotipos [Tesis Licenciatura]. Moquegua, Perú: Universidad Nacional de Moquegua. 126p.
- Puma-Isoiza GG, Liñan-Pérez JF, Coavoy-Sánchez I, Coronado-Olano J, Salas-Valerio WF, Vargas-Delgado LF. 2018. Vida en anaquel de galletas saladas utilizando pruebas aceleradas. *Anales Científicos* 79(1):218-225.
- Rahman NA, Abdul SZ, Lokmanalhakim LA, Taip FS, Mustapa SM. 2017. Response Surface optimization for hot air-frying technique and its effects in the quality of sweet potato snacks. *Journal of Food Process Engineering* 40(4):E12507-E12514.
- Ribas-Agustí A, Martín-Belloso O, Soliva-Fortuny R, Elez-Martínez P. 2017. Food processing strategies to enhance phenolics compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58(15):2531-2548.
- Rodríguez TM, Sampaio KB, Leite de Souza E. 2018. Sweet potato roots: unrevealing an old food as a source of health promoting bioactive compounds – A review. *Trends in Food Science and Technology* 85:277-286.
- Ruttarattanamongkol K, Chittrakorn S, Weerawatanakorn M, Dangpium N. 2016. Effect of drying conditions on properties, pigments, and antioxidant activity retentions of



pretreated orange and purple-fleshed sweet potato flours. *Journal of Food Science and Technology* 53(4):1811-1822.

SADER Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2016. Disponible de: <http://www.agricultura.gob.mx/>. Consultado: junio de 2020.

Sáez-Ceniceros B. 2019. Modelado de la difusividad efectiva y optimización de la deshidratación convectiva en rodajas de pera (*Pyrus communis* L.) cv. D'Anjou. [Tesis de Maestría]. Sinaloa, México. Universidad Autónoma de Sinaloa.

Salazar R, Arámbula-Villa G, Luna-Bárceñas G, Figueroa-Cárdenas JD, Azuara E, Vázquez-Landaverde PA. 2014. Effect of added calcium hydroxide during corn nixtamalization on acrylamide content in tortilla chips. *Food Science and Technology* 56:87-92.

Santos NC, de Farias-Leite DD, Câmara GB, Barros SL, dos Santos FS, da Cunha-Soares T, de Melo-Queiroz AJ. 2020. Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas da toranja (*Citrus paradisi* Macf.). *Research, Society and Development* 9(1):9-27.

Savas E. 2022. The modelling of convective drying variables effect on the functional properties of sliced sweet potatoes. *Foods* 11:741-757.

Schweinberger CM, Sebben JA, Schultz PH, Trierweiler JO, Trierweiler LF. 2020. Study of three drying methods in production of nutritious flours from the fermentation slurry of orange-fleshed sweet potato. *Journal of Food Processing and Preservation* 44(9):e14658.

- Sebben JA, Trierweiler LF, Trierweiler JO. 2017. Orange-fleshed sweet potato flour obtained by drying in microwave and hot air. *Journal of Food Processing and Preservation* 41(1):e12744.
- SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2019. Disponible de: <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado: junio de 2020.
- Sohany M, Tawakkal ISMA, Ariffin SH, Shah NNAK, Yusof YA. 2021. Characterization of anthocyanin associated purple sweet potato starch and peel-based pH indicator films. *Foods* 10(9):2005.
- Souza DG, Resende O, Moura LC, Weder N, Ferreira J, Andrade JWS. 2019. Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Engenharia Agrícola* 39(2):176-181.
- Suárez S, Mu T, Sun H, Añón MC. 2020. Antioxidant activity, nutritional, and phenolic composition of sweet potato leaves as affected by harvesting period. *International Journal of Food Properties* 23(1):178-188.
- Sui W, Mu T, Sun H, Yang H. 2019. Effects of different drying methods on nutritional composition, physicochemical, and functional properties of sweet potato leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*. 1-11.
- Thao BTT, Vo TTK, Tran TYN, Le DT, Tran TT, Bach LG, Dao TP. 2023. Application of mathematical techniques to study the moisture loss kinetics and polyphenol degradation kinetics of mango (*Mangifera indica* L.) slices during heat pump drying by pilot equipment. *Food Science and Technology* 176:114454.

- Tortoe C, Akonor P, Koch K, Menzel C, Adofo K. 2017. Physicochemical and functional properties of flour from twelve varieties of Ghanaian sweet potatoes. *International Food Research Journal* 24(6):2549-2556.
- Tsai Y, Lin L, Yang K, Chiang Y, Chen M, Chiang P. 2021. Effects of roasting sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam.): quality, volatile compound, and sensory evaluation. *Foods* 10:2602-2615.
- Ulfa GM, Putri WDR, Fibrianto K, Prihatiningtyas R, Widjanarko SB. 2020. The influence of temperature in swelling power, solubility, and water binding capacity of pregelatinised sweet potato starch. *Earth and Environmental Science* 475(1):012036.
- USDA U.S. Department of Agriculture. 2005. Disponible de: [www.usda.gov](http://www.usda.gov). Consultado: junio 2020.
- Vidal AR, Zaucedo-Zuñiga AL, Ramos-García ML. 2018. Propiedades nutrimentales del camote (*Ipomoea batatas* L.) y sus beneficios en la salud humana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 19(2):132-146.
- Waidyarathna GRNN, Ekanayake S, Chandrasekara A. 2021. Comparative analysis of nutrient composition and glycemic indices of nine sweet potatoes (*Ipomoea batatas*) varieties. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 15(4):1410-1420.
- Wang A, Li R, Ren L, Gao X, Zhang Y, Ma Z, Ma D, Luo Y. 2018. A comparative metabolomics study of flavonoids in sweet potato with different flesh colors (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.). *Food Chemistry* 260:124-134.

- Wang J, Wu G, Wang Z, Shu B, Li L, Zhang R, Su D. 2020. The influence of processing conditions on kinetics, anthocyanin profile and antioxidant activity of purple sweet potato subjected to hot air drying. *Journal of Food Process Engineering* 43(9):e13472.
- Wei S, Lu G, Cao H. 2017. Effects of cooking methods on starch and sugar composition of sweet potato storage roots. *PLoS ONE* 12(8):e0182604-e0182613.
- Wu Q, Qu H, Jia J, Kuang C, Wen Y, Yan H, Gui Z. 2015. Characterization, antioxidant and antitumor activities of polysaccharides from purple sweet potato. *Carbohydrate Polymers* 132:31-40.
- Xiao YD, Huang WY, Li DJ, Song JF, Liu CQ, Wei QY, Yang QM. 2018. Thermal degradation kinetics of all-trans and cis-carotenoids in a light-induced model system. *Food Chemistry* 239:360-368.
- Yam KL, Papadakis SE. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61:137-142.
- Yang JH, Park HY, Kim YS, Choi IW, Kim SS, Choi HD. 2012. Quality characteristics of vacuum-fried snacks prepared from various sweet potato cultivars. *Food Science and Biotechnology* 21:525-530.
- Yong H, Wang X, Sun J, Fang Y, Liu J, Jim C. 2018. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. *International Journal of Biological Macromolecules* 120:1632-1638.

Zengin G, Locatelli M, Stefanucci A, Macedonio G, Novellino E, Mirzaie S, Dvorácskó S, Carradori S, Brunetti L, Orlando G, Menghini L, Ferrante C, Recinella L, Chiavaroli A, Leporini L, Mollica A. 2017. Chemical characterization, antioxidant properties, anti-inflammatory activity and enzyme inhibition of *Ipomoea batatas* L. leaf extracts. International Journal of Food Properties 20:S1907-S1919.

Zhou DN, Zhang B, Chen B, Chen HQ. 2017. Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch. Food Chemistry 230:516-523.

## ABREVIATURAS



$\tau$	Tortuosidad
$V_{extrc}$	Volumen específico de extracción
AA	Ácido Ascórbico
AOAC	Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (del inglés, Association of Official Analytical Chemists)
$a_w$	Actividad de agua
CF	Compuestos Fenólicos
$C_f$	Factor de conversión de nitrógeno a proteína
col	Colaboradores
CT	Carotenoides Totales
$D_e$	Difusividad efectiva
F	Fracturabilidad
FTC	Función del Tiempo al Cuadrado
FTIR	Infrarrojo con Transformada de Fourier (del inglés, Fourier Transform Infra Red)
g <sub>s.s.</sub>	Gramos de sólidos secos
$k_Y$	Coefficiente de transferencia de masa
$L^*, a^*, b^*$	Variables de color Hunter-Lab para muestras horneadas
$L_f^*, a_f^*, b_f^*$	Variables de color Hunter-Lab para muestras frescas
LSD	Diferencia Mínima Significativa (del inglés, Least significant difference)
MAS	Método de Aproximaciones Sucesivas
$m_c$	Masa del contenedor
$m_{cc}$	Masa del contenedor con cenizas
$m_{ce}$	Masa del contenedor con residuo de extracto
MeqA	Miliequivalente del ácido cítrico
mg <sub>AA</sub>	Miligramos de Ácido Ascórbico
mg <sub>EAG</sub>	Miligramo de Equivalente de Ácido Gálico
mg <sub>EBC</sub>	Miligramos de Equivalente de $\beta$ -Caroteno

$m_m$	Masa de la muestra
$MPS$	Método de Pendientes por Subperiodos
$m_{cg}$	Masa del contenedor con residuo de grasa
$m_{s.s.}$	Masa de la muestra seca
$N$	Normalidad
$N_c$	Densidad de flujo de masa
$PVC$	Periodo de Velocidad Constante
$PVD$	Periodo de Velocidad Decreciente
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (del inglés, United States Department of Agriculture)
$V_A$	Volumen de alícuota
$V_g$	Volumen gastado
$V_{HCl}$	Volumen de ácido clorhídrico gastado
$V_T$	Volumen total
$X/X_0$	Razón del contenido de humedad
$X_0$	Contenido de humedad inicial
$X_\infty$	Contenido de humedad en el equilibrio
$X_c$	Contenido de humedad crítico
$\alpha$	Parámetro de forma
$\beta$	Parámetro de escala de tiempo
$\Delta E$	Diferencia total de color
$\varepsilon$	Porosidad
$\varepsilon_m$	Coefficiente de extinción másico

## ORIGINAL ARTICLE

## Integrated Food Science

## Analysis of physicochemical variables and bioactive compounds in baked sweet potato snacks

Olivia Caro-Hernández<sup>1</sup> | Ernesto Aguilar-Palazuelos<sup>1</sup>  |  
 Roberto Gutiérrez-Dorado<sup>1</sup> | José Caro-Corrales<sup>1</sup>  | Noelia Jacobo-Valenzuela<sup>1</sup> |  
 Marco Carrasco-Escalante<sup>1</sup> | Rosalina Iribe-Salazar<sup>1</sup> | Yessica Vázquez-López<sup>2</sup> |  
 Felicitas Pacheco-Plata<sup>1</sup> | Irma Leticia Camacho-Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

<sup>2</sup>Posgrado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

## Correspondence

Irma Leticia Camacho-Hernández,  
 Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

Email: [icamachoguas@uas.edu.mx](mailto:icamachoguas@uas.edu.mx)

**Abstract:** Sweet potatoes have been the focus of study due to their nutritional content, as they are considered a food that can help reduce malnutrition owing to their energy contribution. In addition, they serve as a source of other compounds with biological activity that can offer health benefits. The objective of this research was to evaluate the effect of baking temperature on the physicochemical properties and bioactive compounds of sweet potato snacks and to analyze the kinetics for these variables during the process as a function of temperature and time. Fracturability ( $F$ ), water activity ( $a_w$ ), color variables ( $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$ ), total color difference ( $\Delta E$ ), ascorbic acid ( $AA$ ), phenolic compounds ( $PC$ ), and total carotenoids ( $TC$ ) of raw and baked sweet potatoes at 100, 120, and 140°C were measured. The kinetics of moisture content ratio ( $X/X_0$ ), fracturability ( $F$ ), water activity ( $a_w$ ), and total color difference ( $\Delta E$ ) were set up. Physicochemical analysis showed that higher baking temperatures led to softer texture with reduced water activity and significant color changes. Bioactive compounds:  $AA$ ,  $PC$ , and  $TC$  exhibited a reduction with temperature. Despite these temperature-induced reductions, significant retention of  $AA$  and partial retention of  $PC$  and  $TC$  for these nutrient and antioxidants were achieved. Kinetic analysis emphasized the dynamic nature of physicochemical transformations during baking, providing valuable insights for both the food industry and consumer acceptance.

## KEYWORDS

baking snacks, sweet potato, physicochemical properties, bioactive compounds, kinetics

**Practical Application:** Comprehending the kinetics of quality variables allows to understand the changes occurring in the food during the baking process. This knowledge enables the development of more efficient and controlled baking processes for producing healthier sweet potato snacks with characteristics that harmonize with consumers' preferences.





**Latin2022**  
10th Food Science,  
Biotechnology & Safety Congress  
Exposición Nacional de Ciencia de los Alimentos & C  
MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE

## Mexican Association of Food Science

This certificate is presented to:

**Caro-Hernández, O.C., Aguilar-Palazuelos, E., Caro-Corrales, J.J., Gómez-Aldapa, C.A.,  
Gutiérrez-Dorado, R., Jacobo-Valenzuela, N. & Camacho-Hernández, I.L.**

In recognition for the poster presentation of the work entitled

**Effective moisture diffusivity in baked sweet potato snacks**

at the 10th Food Science, Biotechnology and Safety Congress Latin Food 2022  
which took place on November 16-18 in Puebla, Mexico.

Dr. Rosa María Rodríguez Jasso  
President of AMECA

Dr. Gilber Vela Gutiérrez  
President of the Organizing Committee

Dr. Celeste C. Ibarra Herrera  
President of the Scientific Committee

# AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.



Investigación e industria: inclusión, retos y oportunidades para la Ingeniería Química en México

**UDLAP**

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

otorga la presente

**CONSTANCIA**

a:

**Olivia Clarissa Caro Hernández**

Por su asistencia al  
XLIV Encuentro Nacional de  
la AMIDIQ

  
Dr. Azucena Rosado Hernández  
Presidente del Comité Organizador

  
Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz  
Presidente Nacional de la AMIDIQ

  
Dr. Toribio Vivasos Guerra  
Presidente del Comité Técnico

Huatulco, Oaxaca, México 30 de mayo al 2 de junio de 2023

# Mexican Association of Food Science

THIS CERTIFICATE IS PRESENTED TO:

Caro-Hernández, Olivia Clarissa; Aguilar-Palazuelos, Ernesto; Caro-Corrales, José de Jesús; Carrasco-Escalante, Marco César; Gil-Gaxiola, Miriam; and Camacho-Hernández, Irma Leticia

IN RECOGNITION BY POSTER PRESENTATION:

PP III 35

QUALITY VARIABLES KINETICS DURING BAKING OF SWEET POTATOES SLICES

at the 11th International Food Science, Biotechnology and Safety Congress Latin Food 2024 which took place on November 13-15 in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico.



Dr. César Ozuna López  
PRESIDENT OF THE ORGANIZING  
COMMITTEE



Dr. Gilber Vela Gutiérrez  
PRESIDENT OF AMECA



Dra. Efigenia Montalvo González  
PRESIDENT OF THE SCIENTIFIC  
COMMITTEE



Otorgan el presente

# RECONOCIMIENTO

A:

CARO-HERNÁNDEZ OC; AGUILAR-PALAZUELOS E;  
CARO-CORRALES JJ; CARRAZCO-ESCALANTE MC;  
GIL-GAXIOLA M; CAMACHO-HERNÁNDEZ IL

Por su participación en la exposición de **Carteles Presentados en Congresos del 2024**, desarrollada en el marco de la Jornada Universitaria del Conocimiento UAS – 2024, realizada el día 21 de noviembre de 2024, en las instalaciones de la FCQB-UAS.

ATENTAMENTE  
*SURSUM VERSUS*  
CULIACÁN, SINALOA, DICIEMBRE 2024

*Eusiel Rubio Castro*  
DR. EUSIEL RUBIO CASTRO  
DIRECTOR FCQB