



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Evaluación de parámetros de calidad e ingenieriles en la
cocción de chayote (*Sechium edule Sw.*)

TESIS

Que presenta

IBQ. OLIVIA CLARISSA CARO HERNÁNDEZ

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directora de Tesis

DRA. IRMA LETICIA CAMACHO HERNÁNDEZ

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Caracterización Química y Funcional de Alimentos y el Laboratorio de Mediciones Termofísicas de la Maestría 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 del Dr. José de Jesús Caro Corrales y el MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla. Olivia Clarissa Caro Hernández recibió beca por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán el día 19 del mes Noviembre del año 2019, la que suscribe Olivia Clarissa Caro Hernández alumna del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 0904676-3, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y cede los derechos del trabajo titulado “Evaluación de parámetros de calidad e ingenieriles en la cocción de chayote (*Sechium edule Sw.*)”, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Olivia Caro

Olivia Clarissa Caro Hernández

Nombre completo y firma

AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios** por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

Especialmente gracias a **mis padres** por su apoyo y amor incondicional, por ser los promotores de mis sueños, por confiar y creer siempre en mí, por las ocasiones de relajación y sus palabras de aliento en los momentos de desesperación. A **mi mamá, Olivia Hernández** por siempre permitir que me desahogue con ella, tener un sabio consejo y muestras de afecto para motivarme a seguir trabajando.

A mis hermanos por estar a mi lado, a **José** por siempre cuidarme como hermano mayor y ayudarme con dificultades técnicas y a **Paty** por aceptar mis largas horas de trabajo y siempre escuchar.

A mi Directora de Tesis, la **Dra. Irma Leticia Camacho Hernández**, por su confianza y excelente disposición al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia para aclarar cualquier duda que surgiera, por el tiempo prestado para asesorías aun en días de descanso y los momentos de relajación compartidos. Gracias por permitirme ser su estudiante de posgrado y por su amistad desde que fue mi profesora en la licenciatura.

Al **Dr. José de Jesús Caro Corrales** por su excelente asesoría, su completa entrega y dedicación para la terminación de esta tesis, por ayudarme a siempre encontrar la solución a los problemas que se presentaran ya fueran técnicos o teóricos y por sus palabras de motivación, su paciencia, tranquilidad y gran experiencia permitían sentir y saber que todo iba a salir bien. Por los momentos de esparcimiento social, el tiempo brindado para dudas y ensayos y por prepararme lo mejor posible para las presentaciones. Gracias por permitirme trabajar bajo su asesoría en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas.

Al **MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla** por la orientación y apoyo a este trabajo, pero sobre todo por sus correcciones tan precisas.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, a la **Facultad de Ciencias Químico-Biológicas** y al **Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos** por darme la oportunidad de continuar con mi crecimiento profesional.

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

A mis compañeros del Laboratorio de Mediciones Termofísicas: **Felicitas, Melissa, Luis Carlos** y **Rogelio** por hacer llevaderas las horas en el laboratorio, las largas pláticas y debates sobre cualquier tema, por su apoyo moral, por siempre tener disposición para ayudar o aclarar dudas, por los momentos compartidos dentro y fuera del laboratorio y sobre todo por su amistad. A los compañeros que ya no están que siempre tuvieron disposición para solucionar dudas y a **Carlos Andrés** por enseñarme muchas de las técnicas empleadas en el laboratorio para la realización de esta tesis.

A mis compañeros de generación por las risas y experiencias vividas.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE CUADROS	xv
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
A CHAYOTE	7
1 Generalidades	7
a Características botánicas	9
b Taxonomía	12
c Características morfológicas	12
2 Contenido nutrimental	12
3 Importancia	16
a Importancia económica	16
1) Producción mundial	16
2) Producción nacional	17
4 Procesamiento industrial del chayote	17
a Productos derivados del chayote	17
B COCCIÓN	17
1 Generalidades	17
2 Tipos de cocción	20
a Cocción en agua	20

b Cocción al vapor	20
c Cocción en aceite	21
3 Efecto de la cocción en agua sobre atributos de calidad	21
C PEROXIDASA	22
D MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	23
1 Conducción	23
2 Convección	24
3 Radiación	24
E TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO	25
1 Transferencia de calor considerando las resistencias interna y externa	25
a Placa infinita	25
2 Transferencia de calor con resistencia interna despreciable	26
a Método de parámetros concentrados	26
3 Transferencia de calor cuando existe una fuente lineal de calor	29
F PROPIEDADES TERMOFÍSICAS	30
1 Conductividad térmica (k)	31
2 Densidad (ρ)	31
3 Difusividad térmica (α)	32
4 Capacidad calorífica específica (C_p)	33
G SIMULACIÓN	34
1 Generalidades	34
2 Ventajas de la simulación	34

3 Proceso de desarrollo de un modelo de simulación	35
4 Método numérico para la simulación	35
a Análisis con elemento finito	35
IV JUSTIFICACIÓN	37
V OBJETIVOS	38
A OBJETIVO GENERAL	38
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
VI MATERIALES Y MÉTODOS	39
A MATERIALES	39
1 Materia prima	39
B MÉTODOS	39
1 Cortado	39
2 Cocción	39
3 Parámetros fisicoquímicos	40
a Firmeza	40
b Humedad	40
c Color y diferencia total de color (ΔE)	41
d pH	42
e Acidez titulable	42
f Sólidos solubles totales (<i>SST</i>)	43
4 Parámetro nutrimental	43
a Ácido ascórbico	43
5 Parámetro fitoquímico	44

a Compuestos fenólicos	44
6 Parámetro enzimático	45
a Actividad de peroxidasa	45
7 Parámetros ingenieriles	47
a Conductividad térmica (k)	47
b Densidad (ρ)	49
c Difusividad térmica (α)	50
d Capacidad calorífica específica (C_p)	50
e Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	51
8 Simulación de la transferencia de calor durante la cocción y enfriamiento	53
a Solución analítica para placa infinita	53
b Elemento finito	54
9 Predicción de la actividad remanente de peroxidasa	55
10 Métodos estadísticos	56
a Diseño experimental	56
b Optimización	56
c Análisis de datos	56
d Validación del modelo de predicción	59
e Contraste del chayote cocido optimizado respecto al fresco	59
f Parámetros ingenieriles	59
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60

A PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL, FITOQUÍMICO Y ENZIMÁTICO DE RODAJAS DE CHAYOTE EN FRESCO	60
1 Parámetros fisicoquímicos	60
a Firmeza	60
b Humedad	60
c Color	60
d pH	61
e Acidez titulable	61
f Sólidos solubles totales SST	61
2 Parámetro nutrimental	62
a Ácido ascórbico	62
3 Parámetro fitoquímico	62
a Compuestos fenólicos	62
4 Parámetro enzimático	62
a Actividad de peroxidasa	62
B MODELOS DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL, FITOQUÍMICO Y ENZIMÁTICO DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDO	63
1 Retención de firmeza (% <i>RF</i>)	63
2 Diferencia total de color (ΔE)	65
3 Retención de ácido ascórbico (% <i>RAA</i>)	67
4 Retención de compuestos fenólicos (% <i>RCF</i>)	70
5 Actividad remanente de peroxidasa (% <i>ARP</i>)	72

C MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDAS	74
1 Optimización del proceso de cocción	74
2 Validación de los modelos de predicción	77
D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL, FITOQUÍMICO Y ENZIMÁTICO DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDO OPTIMIZADO RESPECTO AL FRESCO	79
1 Parámetros fisicoquímicos	79
a Firmeza	79
b Humedad	79
c Color	81
d pH	81
e Acidez titulable	81
f Sólidos solubles totales (<i>SST</i>)	82
2 Parámetro nutrimental	82
a Ácido ascórbico	82
3 Parámetro fitoquímico	82
a Compuestos fenólicos	82
4 Parámetro enzimático	83
a Actividad de peroxidasa	83
E EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INGENIERILES EN LA COCCIÓN DE RODAJAS DE CHAYOTE	83
1 Conductividad térmica (<i>k</i>)	83

2 Densidad (ρ)	85
3 Difusividad térmica (α)	87
4 Capacidad calorífica específica (C_p)	89
5 Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	91
F SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	94
G VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	96
H PREDICCIÓN DE LA ACTIVIDAD REMANENTE DE PEROXIDASA	100
1 Predicción matemática de la actividad remanente de peroxidasa	100
2 Validación de la predicción de la actividad remanente de peroxidasa	100
VIII CONCLUSIONES	105
IX BIBLIOGRAFÍA	107
ABREVIATURAS	120
ANEXOS	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	pág.
1	Diversidad botánica de chayotes (<i>Sechium edule</i> Sw.).	10
2	Fruto de chayote (<i>Sechium edule</i> Sw.) cv. <i>virens levis</i> .	11
3	Morfología de la planta de chayote (chayotera).	14
4	Producción nacional de chayote en México en el periodo de 2007 a 2016.	19
5	Efecto del tiempo y temperatura de cocción sobre la retención de firmeza (% <i>RF</i>) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.	64
6	Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE , respecto al fresco) después de la cocción de rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.	66
7	Efecto de la temperatura y tiempo de cocción sobre la retención de ácido ascórbico (% <i>RAA</i>) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.	68
8	Efecto del tiempo y temperatura de procesamiento sobre la retención de compuestos fenólicos (% <i>RCF</i>) de rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.	71
9	Efecto de la temperatura y el tiempo de cocción sobre la actividad remanente de peroxidasa (% <i>ARP</i>) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.	73

10	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas del proceso de cocción de rodajas de chayote.	76
11	Conductividad térmica (k) para rodajas de chayote en función de la temperatura.	84
12	Densidad (ρ) para rodajas de chayote en función de la temperatura.	86
13	Difusividad térmica (α) para rodajas de chayote en función de la temperatura.	88
14	Capacidad calorífica específica (C_p) para rodajas de chayote en función de la temperatura.	90
15	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de cocción a 65 °C (calentamiento).	92
16	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el enfriamiento en aire a 20 °C.	93
17	Modelo tridimensional de una rodaja de chayote mediante el método de elemento finito (MEF).	95
18	Perfiles de temperatura de la rodaja de chayote utilizando el método de elemento finito (MEF).	97
19	Historias de temperatura para el nodo A de la rodaja de chayote estimada con (a) solución analítica para placa infinita y (b) método de elemento finito, comparadas con la experimental.	98

20	Historias de temperatura para el nodo B de la rodaja de chayote estimada con (a) solución analítica para placa infinita y (b) método de elemento finito, comparadas con la experimental.	99
21	Gráfico de velocidad letal para rodaja de chayote cocida.	101
22	Representación de la sección utilizada para medir experimentalmente la actividad remanente enzimática de rodajas de chayote cocidas.	102

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	pág.
1	Clasificación taxonómica del chayote.	13
2	Composición química del chayote (<i>Sechium edule Sw</i>).	15
3	Producción nacional por estados de chayote en el año 2016.	18
4	Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de cocción.	57
5	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en rodajas de chayote cocidas en condiciones optimizadas.	78
6	Comparación de las variables fisicoquímicas, nutrimental, fitoquímica y enzimática de rodajas de chayote cocido optimizado respecto al fresco.	80
7	Actividad remanente de peroxidasa predicha y experimental para rodajas de chayote cocidas a 65 °C.	104

I RESUMEN

El fruto de chayote (*Sechium edule* Sw.) posee un alto contenido de agua y bajo contenido de lípidos, además aporta vitamina C y minerales. Su comercio ha ido en aumento y generalmente se consume cocinado, horneado, en puré o frito. La cocción es un tratamiento térmico que induce cambios en propiedades sensoriales en los alimentos para su consumo; sin embargo, puede afectar otros parámetros de calidad. El objetivo de este proyecto fue optimizar la cocción de rodajas de chayote con base en parámetros fisicoquímicos, nutrimental, fitoquímico y enzimático; así como simular la transferencia de calor durante el proceso para estimar la actividad remanente de peroxidasa. Se determinó firmeza (técnica de punción), humedad (termogravimetría), color (colorimetría), pH (potenciometría), acidez titulable (titulación), sólidos solubles totales (refractometría), ácido ascórbico, compuestos fenólicos (CF) y actividad de peroxidasa (espectrofotometría). Se utilizó metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto rotatable, los factores fueron temperatura (80 a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min). Las variables de respuesta para optimización fueron retención de firmeza (% *RF*), diferencia total de color (ΔE), retención de ácido ascórbico (% *RAA*), retención de compuestos fenólicos (% *RCF*) y actividad remanente de peroxidasa (% *ARP*). Las respuestas deseables fueron; mayor % *RAA* y % *RCF* así como menor % *RF*, ΔE y % *ARP*. En rodajas de chayote cocidas en las condiciones óptimas se determinaron los parámetros de calidad ya mencionados y se compararon con los del fresco. A las rodajas procesadas térmicamente se le determinaron los parámetros ingenieriles a 25, 55 y 85 °C: conductividad térmica (k) y difusividad térmica (α) (método de la fuente lineal de calor), densidad (ρ) (desplazamiento de volumen) y capacidad calorífica específica (C_p) (definición de α), así como, el coeficiente convectivo (h) (método de parámetros concentrados) tanto para

la cocción en agua (65 °C, 2 min) como para enfriamiento en aire (20 °C, 10 min). Se realizaron simulaciones de historias de temperatura con la solución analítica para placa infinita al usar parámetros termofísicos constantes y el método de elemento finito (MEF) con parámetros dependientes de la temperatura. Se predijo la actividad remanente de peroxidasa al usar la historia de temperatura simulada con el MEF mediante cálculos de penetración de calor y después, la predicción se validó experimentalmente. Las condiciones óptimas fueron 88.5 °C y 3.7 min. Las respuestas óptimas fueron % $RF = 65.5$, $\Delta E = 8.3$, % $RAA = 50.2$, % $RCF = 76.0$ y % $ARP = 42.5$. La deseabilidad global fue 0.678. En rodajas de chayote cocidas en las condiciones optimizadas, los parámetros de calidad fueron diferentes a los de rodajas de chayote fresco, excepto el parámetro a^* de color y la acidez titulable. El parámetro k se encontró en un rango de 0.566 a 0.760 $W m^{-1} K^{-1}$, ρ estuvo entre 1013 y 782 $kg m^{-3}$, α osciló desde 1.39×10^{-7} a $2.41 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$, mientras que C_p varió de 3941 a 3994 $J kg^{-1} K^{-1}$. El coeficiente h para la cocción en agua fue $367.6 \pm 9.7 W m^{-2} K^{-1}$ y para enfriamiento $25.0 \pm 0.5 W m^{-2} K^{-1}$. En el contraste de las historias de temperatura simuladas contra las experimentales se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) mayores a 0.92, lo que refleja la bondad de los ajustes; el mayor coeficiente R^2 fue el obtenido al usar la simulación con el MEF. Con el estudio de penetración de calor se predijo una actividad remanente de peroxidasa de 31.06 % y en forma experimental se obtuvo 31.12 ± 4.4 %. Se obtuvieron las mejores condiciones de temperatura y tiempo para la cocción de rodajas de chayote a fin de lograr los parámetros de calidad deseables y se predijo en forma satisfactoria la actividad de peroxidasa después del proceso de cocción, únicamente con cálculos de ingeniería. Esto permite estimar la actividad remanente bajo diferentes condiciones de proceso para la cocción de rodajas de chayote sin necesidad de realizar la evaluación experimental.

ABSTRACT

The chayote fruit (*Sechium edule* Sw.) has high water and low lipid content; in addition, it provides vitamin C and minerals. Its marketing has been increasing and is usually consumed cooked, baked, pureed or fried. Cooking is a heat treatment that induces changes in sensory properties in food for consumption; however, it can affect other quality parameters. The objective of this project was to optimize the cooking of chayote slices based on physicochemical, nutrimental, phytochemical and enzymatic parameters; as well as simulate heat transfer during the process to estimate the remaining peroxidase activity. The determined parameters were firmness (puncture technique), humidity (thermogravimetry), color (colorimetry), pH (potentiometry), titratable acidity (titration), total soluble solids (refractometry), ascorbic acid, phenolic compounds (FC) and peroxidase activity (spectrophotometry). Response variables for optimization were firmness retention (% *FR*), total color difference (ΔE), ascorbic acid retention (% *AAR*), phenolic compound retention (% *FCR*) and remaining peroxidase activity (% *RPA*). A rotatable central composite design was used for response surface methodology, factors were temperature (80-90 °C) and time (2-6 min). Desirable responses were higher % *AAR* and % *FCR*, as well as lower % *FR*, ΔE and % *RPA*. In chayote slices cooked at optimal conditions, the aforementioned quality parameters were determined and compared to those of fresh. To the thermally processed slices, the following engineering parameters were determined at 25, 55 and 85 °C: thermal conductivity (k) and thermal diffusivity (α) (linear heat source method), density (ρ) (volume displacement) and specific heat capacity (C_p) (definition for α), as well as, the convective coefficient (h) (lumped parameter analysis) for cooking in water (65 °C, 2 min) and for air cooling (20 °C, 10 min). Temperature history simulations were performed with the analytical solution for an infinite flat plate using constant thermophysical parameters and also with the finite element

method (FEM) with temperature-dependent parameters. The remaining peroxidase activity was predicted using the FEM simulated temperature history by heat penetration calculation and then the prediction was experimentally validated. The optimal conditions were 88.5 °C and 3.7 min. The optimal responses were % $FR = 65.5$, $\Delta E = 8.3$, % $AAR = 50.2$, % $FCR = 76.0$ and % $RPA = 42.5$. Overall desirability was 0.678. In cooked chayote slices at optimal conditions, quality parameters were different to those of fresh chayote slices, except the a^* color parameter and titratable acidity. The k parameter ranged from 0.566 to 0.760 W m⁻¹ K⁻¹, ρ was between 1013 and 782 kg m⁻³, α ranged from 1.39×10⁻⁷ to 2.41×10⁻⁷ m² s⁻¹, while C_p varied from 3941 to 3994 J kg⁻¹ K⁻¹. The h coefficient for cooking in water was 367.6 ± 9.7 W m⁻² K⁻¹ and for cooling 25.0 ± 0.5 W m⁻² K⁻¹. In the contrast of simulated temperature histories to the experimental ones, determination coefficients (R^2) higher than 0.92 were obtained, reflecting the goodness of the adjustments; the highest R^2 coefficient was obtained using the FEM simulation. With the heat penetration study, the predicted remaining peroxidase activity was 31.06 % while experimentally is was 31.12 ± 4.4 %. The best temperature and time conditions for cooking chayote slices were obtained in order to achieve the desirable quality parameters and the peroxidase activity after the cooking process was successfully predicted, using only engineering calculations. This allows to estimate the remaining activity under different process conditions for cooking chayote slices without the need to perform the experimental assesment.

I INTRODUCCIÓN

Sechium edule, presenta en México una amplia diversidad biológica especialmente en los estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz (Lira 1996). Se han encontrado plantas con frutos de chayote de diferente forma, tamaño, color, sabor y textura, además pueden presentar o no espinas (Cadena-Iñiguez 2005).

Actualmente el chayote se distribuye prácticamente en los cinco continentes, ya que en los últimos años esta especie ha prosperado comercialmente de hortaliza de traspatio, a producto no tradicional de exportación (Cadena y col 2001), convirtiéndose en uno de los cultivos comerciales más apreciados en el mercado internacional, principalmente en Estados Unidos y los países Europeos (Encarnación 2006), siendo México el primer exportador a nivel mundial de chayote verde liso (*virens levins*) (Cadena-Iñiguez y Arévalo-Galarza 2010).

El consumo de chayote ha adquirido mayor importancia debido a las cualidades que presenta, específicamente su bajo contenido energético, asimismo, es una fuente de vitamina C, minerales y carbohidratos (Castro y col 2015). Su consumo en general es hervido con sal, o azúcar, agregándose a diferentes guisos, caldos y sopas; también se prepara crudo, frito o asado. Con frecuencia es cocinado por cocción, horneado o en puré (Avendaño y col 2010).

La cocción por inmersión consiste en sumergir los alimentos en el líquido (agua) y someterlos a altas temperaturas durante un tiempo determinado, lo que favorece la desnaturalización de enzimas y provoca cambios considerados favorables para la aceptación de los consumidores, lo que hace al alimento más digerible. Sin embargo, cocciones prolongadas pueden tener el efecto contrario, causando lixiviación de los nutrimentos, así como degradación de vitaminas (Nieto 2014).

La optimización de procesos permite conocer las mejores condiciones donde las variables de estudio rinden las respuestas más adecuadas. El modelado es una metodología que implica una representación matemática del comportamiento de un sistema. Si estas ecuaciones son precisas y reproducibles, posibilitan la estimación de las variables en diferentes escenarios de proceso y además, describen la forma en que los factores afectan a dichas respuestas. El modelado adecuado de estos parámetros de calidad permitirá realizar predicciones en el intervalo de las condiciones estudiadas (Bas y Boyaci 2007).

En este estudio se modela la retención de firmeza, la diferencia total de color, la retención de ácido ascórbico, la retención de compuesto fenólicos y la actividad remanente de peroxidasa como función de la temperatura y el tiempo durante la cocción de rodajas de chayote, respecto al producto fresco.

La determinación de las propiedades termofísicas, conductividad térmica, densidad, difusividad térmica y capacidad calorífica específica dependientes de la temperatura facilitará la simulación de la transferencia de calor, con métodos analíticos y elemento finito. La simulación es una metodología que permite disminuir la cantidad de experimentos a realizar. El método analítico consiste en desarrollar un modelo matemático de un sistema obteniendo una reproducción de la operación de un proceso real a través del tiempo (Azarang y García 1996). Mientras que, un análisis con elemento finito consiste en dividir un sistema complejo en constituyentes que son geoméricamente más simples (elementos finitos). El fundamento es que cualquier función continua o discontinua puede representarse por una combinación lineal de polinomios algebraicos (Iribe-Salazar y col 2015). De esta manera al obtener la historia de temperatura mediante simulación con elemento finito se puede predecir matemáticamente la actividad remanente de la enzima peroxidasa en rodajas de chayote.

III REVISIÓN DE LA LITERATURA

A CHAYOTE

1 Generalidades

Sechium edule es conocido con varios nombres comunes, mayoritariamente como chayote, en Estados Unidos es conocido como *christophine*, en Louisiana se llama *mirlinton* y en Japón *cho-cho*. En Colombia, Venezuela, Ecuador y Perú es conocido como cidrayota; y en otros países latinoamericanos como tayota, papa pobre, guatilla, cidra papa, chuchu, cidra, pataste o papa del aire (Moreira 2018).

Se acepta que en el género *Sechium* se encuentran diez especies, de las cuales ocho son silvestres: *S. chinantlense*, *S. compositum*, *S. hintonii*, *S. talamancense*, *S. panamense*, *S. pittieri*, *S. venosum*, *S. vilosum* y dos cultivadas *S. tacaco* y *S. edule* con una distribución desde México hasta Panamá (Lira 1996).

La palabra chayote deriva del vocablo Nahuatl “*chayojtli*” que significa “calabaza con espinas”. Se caracteriza por tener una sola semilla y es considerado un alimento en todos los países latinoamericanos. Casi todas las partes de la planta son comestibles y, desde tiempos precolombinos, sus raíces tuberosas, tallos y frutos han sido consumidos en lo que ahora es México y Guatemala, mientras que sus hojas son usadas como forraje. Cuando está crudo, la pulpa del fruto tiene una textura firme y crujiente, pero después de la cocción, la pulpa tiene una delicada textura suave (Shiga y col 2015).

Esta fruta es de fácil cultivo, se adapta a diferentes climas y se produce durante todo el año. Las mejores condiciones para su desarrollo son entre los 700 y 1200 metros sobre el nivel del mar; y crece bien en clima tropical y sub-tropical cuando la temperatura varía entre los 13

y 21 °C. Además, se produce en suelos sueltos y profundos, ricos en materia orgánica con un pH de 4.5 a 7.5 y en suelos muy arcillosos y arenosos. La cidrayota requiere de alta humedad relativa, entre 80 y 85 %, y una precipitación entre 1500 y 2000 mm al año bien distribuidos (Moreira 2018).

El chayote ha sido cultivado a pequeña escala en algunos países como Inglaterra, Francia y España. Esta planta produce frutos de diferentes formas y tamaños, tallos verdes, hojas tiernas y tubérculos, todos comestibles (Lira 1996).

En México, el chayote es un fruto más de los que sencillamente crecen en huertos familiares y de manera casi natural en los campos. (Encarnación 2006).

Aun cuando el chayote representa una importancia social, económica, cultural y ambiental, no ha sido abordado en un proceso de investigación integral, que permita establecer una vinculación con el usuario y consumidor del mismo (Cadena-Iñiguez y Arévalo-Galarza 2010).

En los últimos años, la preocupación relacionada con la salud y los alimentos ha hecho que el consumidor incluya en su dieta diaria aquellos alimentos que le otorguen beneficios fisiológicos o que tengan funciones nutrimentales que reduzcan el riesgo de alguna enfermedad. Estudios realizados con frutos y hojas de chayote han revelado actividad diurética, antiinflamatoria e hipotensora, incluso como coadyuvante en la eliminación de cálculos renales. El chayote se utiliza como complemento en el tratamiento de arteriosclerosis e hipertensión, alivia la inflamación intestinal y cutánea, además de favorecer la cauterización de úlceras (Diré y col 2003). Contiene además peroxidasas, esteroides, alcaloides, saponinas, fenoles, polifenoles, flavonoides y cucurbitacinas atribuyéndoles actividad antialérgica,

antiinflamatoria, antiviral y efectos antitumorales (Cadena-Iñiguez y col 2005, 2007; Avendaño y col 2010).

Los efectos degenerativos de la composición del fruto son variados como deshidratación, pérdida de peso, marchitez y síntomas de brotación, estos han sido reportados como la principal causa que reduce la calidad comercial y duración del fruto de chayote y evita su exportación a mercados distantes (Pérez y col 2008).

Con frecuencia sus presentaciones culinarias son cocinado, horneado o relleno, en puré, frito o en escabeche, o incluso algunas veces es consumido crudo en ensaladas. Ha sido utilizado para controlar riesgo cardiovascular, diabetes, obesidad y desórdenes renales y urinarios en la medicina herbal tradicional. A pesar de estos beneficios, su costo comercial y aceptabilidad en los mercados internacionales parece estar más influenciado por su apariencia que por su calidad nutricional (Del Ángel y col 2017).

a Características botánicas

Botánicamente, el chayote es un fruto ovoide, o en forma de pera, de tamaño muy variado y con un número variable de depresiones longitudinales. El color de la epidermis abarca desde el blanco, pasando por el verde claro hasta el verde oscuro y brillante; además pueden ser lisos, o cubiertos de vellosidades cortas finas, o con un número variable de espinas (**Figura 1**). La pulpa es de color verde pálida a blanquecina, amarga en las plantas silvestres y dulce en las variedades cultivadas; la semilla tiene forma ovoide con testa lisa y suave (Castro y col 2015).

Específicamente para la variedad “*virens levis*” (**Figura 2**) el tamaño del fruto va de 9.3 a 18.3 cm de longitud, de 6.0 a 11.4 cm de ancho, y de 5.4 a 9.6 cm de grosor; es de forma piriforme, color verde claro, con cinco depresiones longitudinales no muy marcadas, presenta



Figura 1. Diversidad botánica de chayotes (*Sechium edule* Sw.) (Cisneros-Solano 2016).



Figura 2. Fruto del chayote (*Sechium edule* Sw.) cv. *virens levis*. (Avendaño y col 2010)

una hendidura basal no muy profunda, su mesocarpio es verde claro con sabor neutro y medianamente fibroso (Avendaño y col 2010).

b Taxonomía

El chayote es un fruto que pertenece a la familia *Cucurbitaceae*. La clasificación taxonómica del chayote se muestra en el **Cuadro 1**.

c Características morfológicas

La planta que produce al chayote es una enredadera que se caracteriza por su abundante producción de tallos largos de gran ramificación (**Figura 3**) (Encarnación 2006).

Además, es una fruta climatérica y la siembra puede realizarse en cualquier época del año, aunque es común que se haga al inicio de la época lluviosa; la duración del ciclo productivo de la planta es en promedio de tres años (Moreira 2018).

2 Contenido nutrimental

Actualmente, el consumo de chayote ha adquirido mayor importancia gracias a las cualidades saludables que presenta, especialmente por su bajo aporte energético, debido, análogamente a otras hortalizas, al bajísimo contenido de lípidos y alto volumen de agua. Asimismo, es una fuente importante de vitaminas como el ácido ascórbico, cuya concentración oscila entre 11 y 20 mg / 100 g en fruta fresca lo que representa un 27 % de la ingesta diaria recomendada (IDR) para mujeres (75 mg) y un 22 % para hombres (90 mg) (USDA, 2016), además de aportar minerales y gran variedad de carbohidratos (Castro y col 2015). La composición química del chayote se muestra en el **Cuadro 2**.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del chayote

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Cucurbitales</i>
Familia	<i>Cucurbitaceae</i>
Género	<i>Sechium</i>
Especie	<i>Edule</i>

Fuente: SIAP 2016



Figura 3. Morfología de la planta de chayote (chayotera).

Cuadro 2. Composición química del chayote (*Sechium edule* Sw.).

Composición	Por 100 g
Agua (g)	94.24
Energía (kcal)	19.0
Proteína (g)	0.82
Lípidos (g)	0.13
Carbohidratos (g)	4.51
Fibra (g)	1.7
Ca ⁺⁺ (mg)	17.0
Fe ⁺⁺ (mg)	0.34
Mg ⁺ (mg)	12.0
P (mg)	18.0
K ⁺ (μg/mL)	125.0
Na ⁺ (mg)	2
Zn (mg)	0.74
Vitamina C (mg)	7.7
Tiamina (mg)	0.025
Riboflavina (mg)	0.029
Niacina (mg)	0.47
Vitamina E (mg)	0.12

Fuente: USDA 2016

Los contenidos se reportan para cada 100 g de materia seca.

3 Importancia

a Importancia económica

Por su alta productividad por unidad de superficie, costo en el mercado y la generación de empleos, el precio comercial del chayote, principalmente la variedad *virens levis*, es sobresaliente. En términos sociales, el chayote, en especial la variedad conocida popularmente como verde liso, representa para México una importante fuente de empleo local en el medio rural. Se ha registrado que en México se producen en promedio 77 toneladas de fruta por hectárea, y su periodo de cosecha se extiende a seis meses, cortando cada tercer día (Avendaño y col 2010; Cadena y Arévalo 2010).

1) Producción mundial

Los principales países productores de chayote además de México, son Costa Rica, Guatemala, Brasil, Estados Unidos de América, Argelia, India, Nueva Zelanda y Australia (SIAP 2016).

México ocupa el primer lugar en producción y exportación de chayote verde liso a nivel mundial con el 53 % del mercado, seguido de Costa Rica. Otros países productores como Guatemala, Brasil, Puerto Rico, Argelia, India, Nueva Zelanda y Australia canalizan la mayor parte de su producción para autoconsumo (Avendaño y col 2010).

El 52 % de las exportaciones de chayote en México son hacia Estados Unidos (Arévalo y Cadena 2016). La preferencia en los mercados de Norteamérica, como producto procedente de México, (sobre todo en la costa oeste de los Estados Unidos de América), ubican al chayote verde liso en la cuarta posición después del aguacate, jitomate y café (Bancomext 2004).

2) Producción nacional

En la República Mexicana, la producción importante se agrupa en los estados de Veracruz, Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí y México (**Cuadro 3**).

En la **Figura 4** se muestra la producción nacional de chayote del año 2007 al año 2016 donde se ve un notable aumento de la producción (SIAP 2016).

4 Procesamiento industrial del chayote

a Productos derivados del chayote

En la industria de alimentos, el fruto se utiliza en la elaboración de alimentos infantiles, jugos, salsas, pastas y deshidratados (Arévalo y Cadena 2016).

B COCCIÓN

1 Generalidades

La cocción es un proceso culinario capaz de transformar física y/o químicamente el aspecto, textura, composición y contenido nutrimental de un alimento mediante la acción del calor con el fin de satisfacer los sentidos de la vista, el gusto y el olfato, lo que hace a los alimentos más digeribles y apetecibles, y aumenta su vida útil y seguridad (Caracuel 2008).

La función básica y principal de la cocción de los alimentos es hacerlos digeribles, eliminar posibles bacterias presentes cuando están crudos, conseguir que resulten apetitosos y proporcionarles la temperatura más adecuada en cada caso. Pero además de estos efectos más o menos visibles y evidentes, las técnicas de cocción empleadas producen en cada alimento cambios en textura, sabor, aspecto y, sobre todo, en su contenido nutrimental (Nieto 2014).

Cuadro 3. Producción nacional por estados de chayote en el año 2016.

Estado	Producción (t)
Chiapas	53
Guanajuato	60
Jalisco	5,372
México	963
Michoacán	20,637
Nayarit	5
Puebla	116
San Luis Potosí	1,050
Tabasco	52
Veracruz	156,520
Yucatán	136

Fuente: SIAP 2016

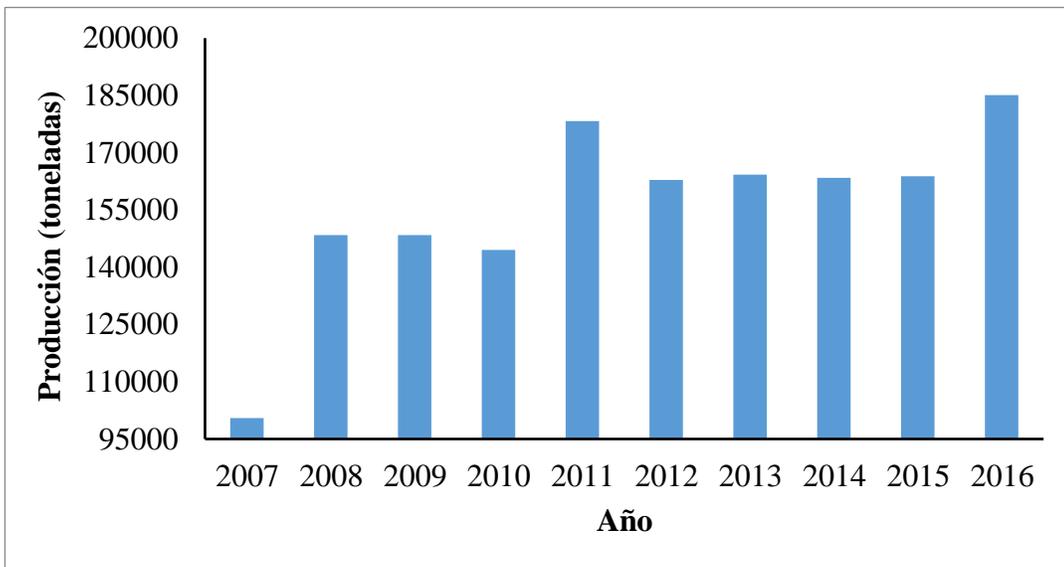


Figura 4. Producción nacional de chayote en México en el periodo de 2007 a 2016 (SIAP 2016).

La cocción comienza con mecanismos de transporte que realizan transferencia de energía y de masa, y que, dependiendo de la naturaleza, tamaño y forma del alimento, y de la intensidad de la fuente de energía, van a producir cambios físicos y químicos en el producto mediante movimiento de las moléculas dentro del alimento y mediante el intercambio de sustancias químicas. La transferencia de calor a los alimentos se puede realizar de tres formas: conducción, convección y radiación; es frecuente la participación de los tres modos durante el cocinado. Durante el cocinado se producen pérdidas nutrimentales, cuya importancia depende del cuidado con que se proteja a los alimentos de los agentes físicos (luz, oxígeno, temperatura, entre otros). La cocción resulta beneficiosa para los alimentos de origen animal pero, generalmente, presenta más inconvenientes que ventajas para las frutas y algunas hortalizas. Conviene utilizar la forma de cocción que mejor mantiene las cualidades nutrimentales de cada alimento, ya que según la técnica que se utilice, se puede enriquecer (sobre todo en contenido energético) o empobrecer (en minerales y vitaminas principalmente) los alimentos (Caracuel 2008).

2 Tipos de cocción

a Cocción en agua

La cocción en agua consiste en sumergir los alimentos en un recipiente con agua y someterlos al calor durante un periodo determinado de tiempo. La cocción preserva el sabor de los alimentos, reduce el riesgo de intoxicaciones alimentarias y los hace más digeribles (Nieto 2014).

b Cocción al vapor

La cocción al vapor se lleva a cabo por el contacto directo del alimento con el vapor de agua, menos denso que ella y por lo tanto sus moléculas hacen contacto menos frecuentemente

con el alimento. Este método presenta algunas ventajas en la conservación de las propiedades de los alimentos, hay menor pérdida de nutrimentos hidrosolubles, se mantiene gran parte del color, sabor y olor, reduce el riesgo de cocción excesiva y adicionalmente, se logra que algunos alimentos resulten más ligeros y fáciles de digerir (Moncada y Gualdrón 2006).

c Cocción en aceite

El freído es una forma de cocción de alimentos a alta temperatura, 180 a 200 °C, donde el medio de transferencia de calor es el aceite que imparte buen sabor, excelente sensación de palatabilidad, color dorado o tostado y crocancia al alimento. Generalmente, los tiempos de freído son menores que los de cocción en agua y al vapor, pero depende del tipo de alimento, la temperatura del aceite, el sistema de fritura, el espesor del alimento y los cambios que se pretende conseguir. El inconveniente de este proceso de preparación está en la incorporación de aceite al alimento, lo que incrementa significativamente el aporte energético y el consumo de grasa (Moncada y Gualdrón 2006).

3 Efecto de la cocción en agua sobre atributos de calidad

Las cocciones prolongadas favorecen las pérdidas de nutrimentos de algunos alimentos, como es el caso de las hortalizas. Para evitarlo, lo mejor es cocinarlas con poca agua y durante el menor tiempo posible. Según el tipo de alimento, la temperatura del agua varía: las hortalizas frescas, las legumbres, los pescados, los huevos y la carne para caldo se añaden al agua fría, mientras que el arroz, la pasta y algunas verduras deben incorporarse cuando el agua ha alcanzado su punto de ebullición (Nieto 2014).

La cocción por inmersión es un proceso de cocción húmeda, en el que la temperatura máxima del agua es de 100 °C a 1 atmósfera, o la correspondiente en otras condiciones de

presión. En el proceso de cocción por inmersión se favorece la hidratación y gelificación del almidón, la desnaturalización de enzimas de pardeamiento, pero hay solubilización parcial de los minerales y pérdida de algunas vitaminas, dependiendo principalmente del tamaño del alimento y del tiempo de cocción. En este caso el alimento se encuentra inmerso en el agua durante la preparación y se facilita la migración de nutrimentos solubles hacia el agua de cocción que normalmente se elimina (Moncada y Gualdrón 2006).

C PEROXIDASA

La peroxidasa (POD) es una oxidoreductasa, que interviene en la síntesis del etileno y por tanto en el control de la actividad respiratoria, en la madurez, senescencia y los cambios asociados a ella. Participa en el desarrollo de aromas extraños durante el almacenamiento, cambios de color y pérdida de ácido ascórbico (Blach y col 2011).

La peroxidasa es miembro de un grupo de enzimas ampliamente distribuidas en la naturaleza que están involucradas en la oxidación de diferentes sustratos en presencia de peróxido de hidrógeno. Estas enzimas participan en procesos metabólicos como la biosíntesis de etileno, desarrollo celular, degradación de clorofilas, la lignificación, las respuestas al estrés provocado por agentes externos e integridad de las membranas (Barbosa y col 2010).

La peroxidasa es reconocida como una de las enzimas presente en hortalizas más resistente (estable) al calor. Por ello es usada como enzima control en tratamientos térmicos. Es deseable llegar a una actividad remanente de peroxidasa lo más baja posible, para algunas hortalizas esto es menor al 10 % después de un proceso térmico (Barbosa y col 2010).

Para comprobar la presencia y actividad de esta enzima, después de un proceso térmico, se utiliza como donador de electrones principalmente el guayacol, el cual por acción de la enzima

en presencia de peróxido de hidrógeno es convertido a tetraguayacol, generando una coloración rojo ladrillo, que puede ser medida en un espectrofotómetro (Robinson 1991).

D MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Todos los mecanismos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. El calor se puede transferir de tres maneras diferentes: conducción, convección y radiación (Cengel 2007).

1 Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases (Cengel 2007). La conducción es representada por lo que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier, cuya forma unidimensional es:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{o} \quad q = -\alpha \frac{d(\rho C_p T)}{dx} \quad (1)$$

Donde:

q = densidad de flujo de calor (W m^{-2}).

$-dT/dx$ = gradiente de temperatura (K m^{-1}),

k = conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

$\alpha = k/\rho C_p$ = difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

ρ = densidad (kg m^{-3}).

C_p = capacidad calorífica específica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

2 Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección (Cengel 2007). La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la forma de generar el flujo, en convección libre y convección forzada.

La ecuación de rapidez de cambio para la transferencia de calor por convección fue expresada por Newton en 1701 y se le conoce como ley de enfriamiento de Newton (Cengel 2007).

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde:

q = densidad de flujo de calor por convección (W m^{-2}).

T_s = temperatura de la superficie ($^\circ\text{C}$).

T_∞ = temperatura del medio de calentamiento ($^\circ\text{C}$).

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$).

3 Radiación

La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por

radiación no requiere la presencia de un medio material para transmitirse. La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. La transferencia de energía por radiación se puede dar en el vacío (Geankoplis 1998).

E TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

La transferencia de calor en estado no estacionario es importante debido al gran número de problemas de calentamiento y enfriamiento que existen en la industria.

La rapidez con la que se calienta o se enfría un material, depende de la resistencia a la transferencia de calor que se presenta en su interior y de la resistencia superficial externa que ofrece el medio de calentamiento o enfriamiento en el que está inmerso el material (Geankoplis 1998).

1 Transferencia de calor considerando las resistencias interna y externa

Estos modelos se aplican para diferentes geometrías, entre las que se encuentran placa, esfera y cilindro infinito. En este proyecto se trabajó con geometría de placa infinita.

a Placa infinita

La ecuación de campo de Fourier para una placa infinita es:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Al comenzar el proceso, la placa se encuentra a temperatura uniforme T_0 y la temperatura del medio se mantiene a T_∞ . El parámetro x se mide desde el centro geométrico de la placa y se considera que tiene un espesor $2L$. La transferencia de calor por conducción que llegue

desde el interior a la superficie de la placa, debe ser igual a la transferencia de calor por convección desde esta superficie hacia el fluido.

De esta manera, la condición inicial y las de frontera son:

$$T(x,0) = T_0$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0$$

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h[T(L,t) - T_\infty]$$

La solución de este sistema es proporcionada por la serie infinita siguiente (Carslaw y Jaeger 1959).

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \lambda_n \cos(\lambda_n x / L)}{\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n} \exp(-\lambda_n^2 Fo) \quad (4)$$

En donde los coeficientes λ_n están dados por $\lambda_n \tan \lambda_n = Bi$ y los números de Biot y Fourier son $Bi = hL/k$ y $Fo = \alpha t / L^2$, respectivamente.

2 Transferencia de calor con resistencia interna despreciable

a Método de parámetros concentrados

Se considera un sólido que tiene una conductividad térmica muy alta o una resistencia interna a la conducción muy baja, en comparación con la resistencia de la superficie externa, donde se presenta una transferencia por convección del fluido externo a la superficie del sólido. Puesto que la resistencia interna es muy baja, la temperatura dentro del sólido es esencialmente uniforme en cualquier momento (Geankoplis 1998).

En diversas circunstancias la temperatura de un sistema durante un proceso de calentamiento o enfriamiento está sujeta casi de manera exclusiva al tiempo, no a la posición. Podría suponerse que en estos casos la conductividad térmica (k) del material que compone el sistema es suficientemente alta para que los gradientes de temperatura en su interior resulten insignificantes. Del mismo modo podría pensarse que el sistema es lo suficientemente pequeño para que las diferencias de temperatura en su interior no sean considerables. Por último, también podría conjeturarse que el coeficiente de transferencia de calor en la interfase sistema-fluido es lo suficientemente pequeño, y que la diferencia de temperatura entre el fluido y el sistema es relevante en dicha interfase y no en el interior del sistema (Manrique 2002). Éstas son las condiciones que se presentan en un sistema cuando la resistencia interna es despreciable y al análisis de la transferencia de calor se le denomina indistintamente método de enfriamiento de Newton, método de la capacitancia térmica global o método de los parámetros concentrados. En consecuencia, la resistencia que controla la transferencia de calor se encuentra en la película externa de fluido que rodea al sólido, donde se presenta la transferencia de calor por convección (Caro-Corrales 2002).

Si aplicamos la primera ley de la termodinámica al sólido, el calor disipado por convección en cualquier instante se refleja en una disminución de su energía interna (Manrique 2002). En forma analítica,

$$hA(T - T_{\infty}) = -\rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Donde:

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$).

A = área del cuerpo donde se intercambia calor por convección (m^2).

ρ = densidad del material que constituye el sistema (kg m^{-3}).

V = volumen del sistema (m^3).

C_p = capacidad calorífica específica del material que constituye el sistema ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

T = temperatura del sistema ($^{\circ}\text{C}$).

T_{∞} = temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$).

Al integrar entre los límites $T = T_0$ cuando $t = 0$, y $T = T$ cuando $t = t$,

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho C_p V} t\right)} \quad (6)$$

Esta expresión da la temperatura en función del tiempo para un cuerpo que inicialmente se encuentra a una temperatura T_0 , situado en un ambiente convectivo a una temperatura constante. Por otro lado, el exponente en la ecuación de los parámetros concentrados es adimensional, al reacomodar los términos se puede reescribir como sigue:

$$\frac{hAt}{\rho C_p V} = \left(\frac{hV}{kA}\right) \left(\frac{A^2 kt}{\rho C_p V^2}\right) = \left(\frac{hV/A}{k}\right) \left(\frac{\alpha t}{(V/A)^2}\right) \quad (7)$$

El cociente de la resistencia térmica por conducción a la de convección puede escribirse como:

$$\frac{R_{\text{conducción}}}{R_{\text{convección}}} = \frac{\frac{L}{k}}{\frac{1}{h}} = \frac{hL}{k} \quad (8)$$

El parámetro adimensional $\frac{hL}{k}$ se conoce como número de Biot. En este número adimensional L es la longitud característica para la conducción de calor. De lo anterior se

desprende que las diferencias de temperatura en el interior del sistema son pequeñas en relación con la caída de la temperatura en la interfase cuando el número de Biot es pequeño. Por ello, se puede decir que si el número de Biot es menor a 0.1, aproximadamente, la temperatura en el interior de un cuerpo depende fundamentalmente del tiempo (Manrique 2002). Se ha encontrado, para las formas geométricas más sencillas como placas, cilindros y esferas, que si $Bi < 0.1$ el error que se introduce al suponer que la temperatura es uniforme, es menor que 5 %, por lo que se debe analizar el número de Biot al utilizar el método de los parámetros concentrados (Cengel 2007).

3 Transferencia de calor cuando existe una fuente lineal de calor

La conducción de calor en estado no estacionario dentro de un material sólido se puede determinar mediante el incremento de temperatura de una fuente lineal de calor sumergida en este. Para ello, se utiliza una sonda, la cual se construye con un tubo delgado que contiene en su interior un alambre y un termopar. Ésta técnica se conoce como método de la fuente lineal de calor o método de la sonda (Mohsenin 1980). La ecuación que describe este análisis es la ecuación de campo de Fourier en coordenadas cilíndricas. Para emplear este método se debe cumplir que al inicio del proceso la temperatura del sólido sea uniforme, por lo que no existe gradiente de temperatura dentro de este y también que la fuente de calor proporcione una transferencia de calor constante por unidad de longitud Q_L , la cual es también uniforme a lo largo de la sonda de prueba. Debido a que el sólido se considera infinito, el gradiente de temperatura en la parte exterior del sólido ($r \rightarrow \infty$) es cero, es decir la transferencia de calor es tan lenta que el extremo del sólido no cambia de temperatura en ningún instante (Murakami y col 1996), por ello, la condición inicial y las dos de frontera son las siguientes:

$$\Delta T(r, 0) = 0$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{r \partial T}{\partial r} \right) = \frac{Q_L}{2\pi k}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [\Delta T(r, t)] = 0$$

En este análisis, las propiedades térmicas son constantes durante la determinación y la conducción de calor se realiza solamente en la dirección radial.

La solución a este sistema es:

$$T - T_1 = \frac{Q_L}{4\pi k} \ln \left(\frac{t}{t_1} \right) \quad (9)$$

De esta manera, al graficar la temperatura contra el logaritmo natural de tiempo se obtiene una recta, cuya pendiente es $\frac{Q_L}{4\pi k}$. El análisis se simplifica aún más si el punto (T_1, t_1) se elige como el instante en que el gráfico empieza a ser lineal (Murakami y col 1996).

El método de la fuente lineal de calor se puede utilizar para determinar la conductividad y difusividad térmica de materiales con k y α inferiores a $2.0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Se puede emplear temperaturas de hasta $600 \text{ }^\circ\text{C}$ y la exactitud del método es $\pm 5 \%$ (Davis 1980). El incremento de temperatura de la fuente lineal de calor en un lapso máximo de 20 min no debe exceder a $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

F PROPIEDADES TERMOFÍSICAS

El conocimiento de las propiedades termofísicas de alimentos, como la conductividad térmica, densidad, difusividad térmica y capacidad calorífica específica, es de importancia fundamental para el diseño, optimización y simulación de procesos que implican transferencia de masa y calor. Entre estos fines está el diseño de equipos de almacenamiento y refrigeración,

la estimación de tiempos de proceso para refrigeración, congelación, calentamiento y secado. Las propiedades termofísicas de los materiales pueden determinarse ya sea por medición directa o al utilizar ecuaciones predictivas basadas en la composición química del alimento.

1 Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica (k) de un material se puede describir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Una conductividad térmica elevada indica que el material es un buen conductor del calor y una conductividad baja indica que es un mal conductor o que es un aislante (Cengel 2007).

En materiales inertes, la conductividad térmica está en función de la temperatura; sin embargo, en el caso de los alimentos, esta propiedad depende de la composición, esencialmente de la humedad, así como de la densidad y otros factores que afectan el flujo de calor a través del material, como forma, tamaño y arreglo de los espacios vacíos del alimento y el grado de homogeneidad del mismo (Sweat 1986). Uno de los métodos más utilizados para determinar conductividad térmica de alimentos es el método de la fuente lineal de calor, ya que los alimentos presentan conductividades bajas y esta técnica se emplea para materiales de k menores a $2.0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Davis 1980).

2 Densidad (ρ)

La densidad de los alimentos sólidos puede determinarse por un método de desplazamiento, ya sea en aire o líquido (Mohsenin 1980), cuando se emplea líquido solamente se requiere de material general de laboratorio. En este método, la muestra es

sumergida en un líquido hasta cubrirla por completo, se puede medir la masa de líquido desplazado por la muestra, o bien, medir su volumen. El medio de desplazamiento líquido puede ser agua; sin embargo para materiales menos densos que el agua se recomienda usar líquidos como tolueno. También se puede recubrir las muestras con una capa delgada de parafina líquida, con lo que se impide la entrada de agua a los espacios vacíos del alimento (Rapusas y Driscoll 1995). Para alimentos sólidos porosos existen los conceptos de densidad real y densidad aparente. La densidad real es la relación de la masa de un material y su volumen real, excluyendo el volumen de los poros internos. La densidad aparente se refiere al volumen del material, que incluye sus poros internos.

3 Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica representa cuán rápido se difunde el calor por un material. Se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea α , más rápida es la propagación de calor en el material. Una difusividad pequeña significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido a través del material.

La difusividad térmica es una propiedad que relaciona la capacidad de un material para conducir calor y su tendencia para cambiar su temperatura.

La difusividad térmica se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\alpha = k / (\rho C_p) \quad (10)$$

Estas propiedades (k , ρ , y C_p) se pueden determinar experimentalmente y al sustituirla en la ecuación se obtiene la difusividad (α). En materiales con difusividad térmica inferior a $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ esta propiedad se puede obtener con el método de la fuente lineal de calor (Davis 1980).

La ecuación de campo de Fourier expresa la variación de la temperatura (T) dentro de un objeto en tres dimensiones (x , y , z) y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

La conductividad térmica, capacidad calorífica específica y densidad de las hortalizas influye en la velocidad de calentamiento en los tratamientos térmicos, y debido a que el intervalo de temperatura implícito en estos tratamientos es reducido, la variación en las propiedades es pequeña. Aunque existieran grandes variaciones en densidad, capacidad calorífica específica y conductividad térmica para diferentes hortalizas, la difusividad térmica para la mayoría de éstos, se encuentran en el intervalo entre 1.4 y $1.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Wang y col 2001).

4 Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica representa la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de un material. Se utiliza el símbolo C_p para designar la capacidad calorífica a presión constante, lo cual aplica para la mayoría de los procesos de calentamiento o enfriamiento en alimentos. Al igual que la conductividad térmica, el C_p de alimentos depende principalmente de la composición del mismo, principalmente de la humedad. Entre las metodologías existentes para determinar capacidad calorífica específica de alimentos, la técnica de calorimetría diferencial de barrido es la más empleada para evaluar el efecto de la

temperatura, porque permite manejar un amplio intervalo de temperaturas en una sola determinación. También se puede usar el método de la sonda cuando se utilizan dos sondas separadas por una distancia conocida.

G SIMULACIÓN

1 Generalidades

La simulación es una metodología que tiene como objeto principal disminuir la cantidad de experimentos a realizar, ya que su función es estudiar a un sistema, o sus partes, mediante manipulación de su representación matemática, o de su modelo físico (Himmelblau y Birchoff 2004). El proceso consiste en el desarrollo de un modelo matemático de un sistema, por medio del cual se obtiene una reproducción de la operación de un proceso real a través del tiempo (Azarang y García 1996). Esta metodología permite diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un proceso, y se realizan experimentos con este modelo con la finalidad de entender el comportamiento dinámico del sistema o de evaluar varias condiciones operacionales del mismo (Coss 1999).

2 Ventajas de la simulación

Algunas ventajas que se obtienen al utilizar modelos de simulación son que destaca el mejoramiento de la operación y escalamiento de los sistemas, se pueden comparar diseños, procesos o ensayar hipótesis sobre la operación de los sistemas antes de realizarlos y permite estudiar los beneficios de diferentes alternativas dentro de un proceso. Tiene como desventaja que su desarrollo generalmente requiere tiempo con el que no se cuenta en ocasiones debido a la necesidad de generar una respuesta, se requiere una gran cantidad de corridas que utilizarían

materiales y equipo, además que en ocasiones pueden proporcionar respuestas que generan un falso sentido de seguridad en las decisiones por tomar (Caro-Corrales 2002).

3 Proceso de desarrollo de un modelo de simulación

Generalmente, el desarrollo de un proceso de simulación se inicia con una detallada definición del sistema, seguida de una etapa de análisis del mismo, la formulación del modelo y su validación. La validación tiene como objetivo determinar la capacidad que posee un modelo para representar la realidad, esta etapa se realiza mediante la comparación estadística entre los resultados del modelo y los experimentales. Después de la validación, se experimenta con el modelo para determinar cómo responde el sistema a cambios en los niveles de los factores de entrada, lo que se realiza a través de un análisis de sensibilidad (Hillier y Lieberman 1989).

4 Método numérico para la simulación

a Análisis con elemento finito

Un análisis con elemento finito consiste en dividir un sistema geoméricamente complejo en un número de constituyentes que son geoméricamente más simples. A dichos constituyentes se les denominan elementos finitos. El principal concepto que involucra este tipo de análisis es la división de un cuerpo en una red de elementos interconectados a través de sus aristas o nodos. Desde el punto de vista matemático, el fundamento central es que cualquier función continua o discontinua puede representarse por una combinación lineal de polinomios algebraicos. A fin de lograr este objetivo se deriva una función de interpolación para cada elemento finito del sistema. Las funciones de interpolación proporcionan las

ecuaciones de cada elemento, las cuales después de agruparlas, aporta la solución del sistema (Iribe-Salazar y col 2015).

IV JUSTIFICACIÓN

El chayote verde liso (*virens levis*) ha sido objeto de estudio ya que representa para México una importante fuente de empleo local en el medio rural, debido a su alta productividad y costo en el mercado, al ser un cultivo de exportación con importancia económica, además posee características nutricionales (fitoquímicos, vitaminas, minerales y aminoácidos esenciales) y se le han atribuido propiedades medicinales (diurético, antihipertensivo, antiinflamatorio y cardiovascular).

La cocción en agua propicia cambios del fruto que se consideran convenientes por el consumidor, sin embargo, en la literatura no hay evidencia de investigaciones donde se optimice el proceso de cocción de rodajas de chayote para obtener las mejores condiciones de tiempo y temperatura en el que se consiga mejores retenciones de parámetros de calidad.

Además, no se han encontrado reportes de la medición de los parámetros ingenieriles en función de la temperatura para simular historias de temperatura de manera analítica y con el método de elemento finito (MEF) de rodajas de chayote durante la cocción, con lo que se podría realizar una predicción de la actividad remanente de peroxidasa después del proceso, de lo cual no se tiene evidencia de artículos donde se haya llevado a cabo esta predicción.

La peroxidasa resulta una enzima de interés ya que genera cambios en el color y olor del chayote, además de ser termoresistente por lo que se busca disminuir su actividad.

Por ello, el presente trabajo se enfoca en optimizar el proceso de cocción de rodajas de chayote para conseguir mayores retenciones de ácido ascórbico y compuestos fenólicos así como minimizar la retención de firmeza, diferencia total de color y actividad remanente de peroxidasa.

V OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Optimar la cocción de rodajas de chayote (*Sechium edule* Sw.) con base en parámetros fisicoquímicos, nutrimental, fitoquímico, enzimático y simular la transferencia de calor para predecir la actividad remanente de peroxidasa.

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.- Realizar una caracterización fisicoquímica (firmeza, humedad, color, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales), nutrimental (vitamina C), fitoquímica (compuestos fenólicos) y enzimática (actividad de peroxidasa) en chayote fresco.

2.- Llevar a cabo la cocción de rodajas transversales de chayote a diferentes condiciones de temperatura (80 a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min) de acuerdo con el diseño experimental.

3.- Encontrar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de cocción de rodajas de chayote mediante metodología de superficie de respuesta con base en retención de firmeza, diferencia total de color, retención de ácido ascórbico, retención de compuestos fenólicos y actividad remanente de peroxidasa.

4.- Contrastar los parámetros fisicoquímicos, nutrimental, fitoquímico y enzimático de rodajas de chayote cocido optimizado respecto al fresco.

5.- Evaluar los parámetros ingenieriles (conductividad térmica, densidad, difusividad térmica, capacidad calorífica específica y coeficiente convectivo de transferencia de calor) de rodajas de chayote durante el proceso de cocción.

6.- Simular la transferencia de calor durante el proceso de cocción y enfriamiento en rodajas de chayote y predecir la actividad remanente de peroxidasa.

VI MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

1 Materia prima

Para la realización de este proyecto se utilizó como materia prima chayote (*Sechium edule* Sw.) variedad *virens levis* el cual fue adquirido en un mercado local. Los lotes fueron seleccionados en relación a un estado de madurez comercial, tomando en cuenta el criterio de homogeneidad de color, forma y tamaño, libres de daños mecánicos y fitosanitarios. Los frutos posteriormente se transportaron al Laboratorio de Medición de Propiedades Termofísicas de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en las fechas requeridas para el desarrollo del trabajo experimental. La materia prima fue lavada con una solución de NaClO a 100 ppm. Los frutos fueron almacenados en refrigeración (10 °C) durante un periodo de 24 a 72 h hasta su posterior utilización.

B MÉTODOS

1 Cortado

Los chayotes fueron cortados en rodajas de cuatro mm de espesor con una rebanadora (RB-250, TORREY, Nuevo León, México), se cuidó que dichas rebanadas no contuvieran semilla.

2 Cocción

La cocción se llevó a cabo mediante inmersión en agua en un baño María (modelo 9500, Fisher Scientific) con condiciones de temperatura entre 80 y 90 °C con una duración de 2 a 6 min, en proporciones de 5 rodajas de chayote de 4 mm de espesor por 600 mL de agua.

3 Parámetros fisicoquímicos

a Firmeza

La firmeza se evaluó de acuerdo con la metodología reportada por Marangoni y col (1995). Rodajas transversales de chayote de 4 mm de espesor se colocaron en la base de un penetrómetro (E-DFE 100, Chatillon Ametek, North California, EUA), la determinación se realizó con una punta plana de 5 mm de diámetro, la cual penetró la superficie de cada rodaja en cinco posiciones diferentes. Las rodajas se colocaron en la base, perpendicularmente a la punta, la distancia de penetración empleada fue de 1 mm con una velocidad de penetración constante de 50 mm/min. Los resultados se reportaron como la fuerza de compresión máxima para penetrar el tejido de la hortaliza expresada en Newton.

b Humedad

Se determinó el contenido de humedad mediante el método termogravimétrico 972.2 descrito por la AOAC (2012). El cual 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 determinó el porcentaje de humedad contenido en la muestra.

Se colocaron las cápsulas de porcelana en un horno de convección (RF-115, redLINE, Alemania) por 24 h a 105 °C para conseguir masa constante (M_{c_e}). Se midieron 1.5 g de muestra fresca (M_{m_f}) junto con la cápsula de porcelana utilizando una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), posteriormente la muestra se secó en la estufa durante 24 h a 105 °C. Una vez pasado el tiempo de secado por convección, se dejó enfriar a temperatura ambiente por 30 min en un desecador. Después se determinó la masa de la muestra seca (M_{m_s}) y se calculó el contenido de humedad con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{Mm_f - (Mm_s - Mc_c)}{Mm_f} (100) \quad (12)$$

Donde:

Mm_f = Masa de la muestra fresca (g).

Mc_c = Masa constante de la cápsula (g).

Mm_s = Masa de la cápsula con la muestra seca (g).

c Color y diferencia total de color (ΔE)

La evaluación de color se expresó en coordenadas Hunterlab, se registraron los parámetros L^* , a^* , y b^* en la superficie de las rodajas de chayote para lo cual se empleó un colorímetro triestímulo (CR-300, Minolta, Osaka, Japón); realizando cinco disparos en cada una de las muestras (Yam y Papadakis 2004). La calibración se llevó a cabo realizando tres disparos en la carta de color blanco, el equipo registró los parámetros predefinidos de $L^* = 97.38$, $a^* = 0.17$ y $b^* = 1.94$.

Para la determinación de la diferencia total de color (ΔE) se midieron los parámetros L_f^* , a_f^* , y b_f^* de color en diferentes zonas de las muestras frescas como control, así como en las muestras cocidas (L^* , a^* y b^*).

Los cálculos de ΔE se realizaron a partir de la siguiente ecuación (Islam y col 2018):

$$\Delta E = \left[(L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Donde:

ΔE = Diferencia total de color en el fruto tratado.

L_f^* , a_f^* , y b_f^* = Parámetros de color de referencia para la muestra fresca.

L^* , a^* y b^* = Parámetros de color de las muestras después del tratamiento.

d pH

El pH se determinó de acuerdo con el método 981.12 de la AOAC (2012), se homogenizaron 10 g de fruto fresco con 50 mL de agua destilada y neutra, se aforó a 100 mL, se filtró la mezcla y la medición se llevó a cabo mediante la inmersión directa del electrodo de vidrio de un potenciómetro (HI 2211, Hanna instruments, EUA), previamente calibrado con buffer a pH 4 y 7, en un vaso de precipitado con la muestra.

e Acidez titulable

La acidez titulable se determinó de acuerdo con la AOAC 942.5 (2012); del homogenizado para la medición de pH se tomó una alícuota de 20 mL y se tituló con NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.1 ± 0.2 (punto de vire de la fenolftaleína). Se reportó como porcentaje de ácido cítrico.

$$AT = \frac{[(VG)(MEqA)(N)(V)]}{[(M_m)(A)]} (100) \quad (14)$$

Donde:

AT = Acidez titulable (% ácido cítrico).

VG = Volumen de NaOH gastado (mL).

$MEqA$ = miliequivalente del ácido cítrico.

N = Normalidad del NaOH (N).

V = Volumen total de disolución (mL).

M_m = Masa de la muestra (g).

A = Volumen de la alícuota (mL).

f Sólidos solubles totales (SST)

El contenido de sólidos solubles totales (SST) se determinó de acuerdo a la metodología reportada por la AOAC 932.12 (2012), se colocó una gota de muestra (fruta fresca y procesada optimizada) en un refractómetro tipo Abbe (300001, Sper Scientific, China). Los resultados se reportan como porcentaje de azúcar (°Brix).

4 Parámetro nutrimental

a Ácido ascórbico

El contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) se determinó con un espectrofotómetro (GENESYS 10uv, Thermo Electron Corporation, Madison, EUA) siguiendo la metodología descrita por Dürst y col (1997), cuyo principio se basa en la reacción del ácido ascórbico con el 2,6 diclorofenolindofenol (DCPI), en donde el ácido ascórbico reduce al DCPI el cual absorbe a 520 nm. Primeramente, se elaboró 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 un stock de ácido ascórbico (1000 ppm) se prepararon estándares a diferentes concentraciones (1, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm), posteriormente se procedió a la construcción de la curva, para lo cual se obtuvo una absorbancia de 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, usando agua desionizada para calibrar a cero, además de una absorbancia L2 para el DCPI residual el cual se consiguió 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 produjo al agregar 0.5 g de muestra a 15 mL de ácido oxálico, se homogeneizó en un Ultra-Turrax IKA (T18 basic SI, Alemania) durante 1 min y se filtró a través de cuatro capas de tela de organza.

Para la determinación de vitamina C en los extractos se obtiene L2 para el DCPI residual mezclando 1 mL de extracto de chayote + 1 mL de buffer de acetato de sodio + 8 mL de DCPI, utilizando para calibrar a cero una mezcla de 1 mL de extracto de chayote + 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 expresó como mg A.A. / 100 g f.f.

5 Parámetro fitoquímico

a Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se determinaron espectrofotométricamente a 760 nm mediante el método descrito por Moo-Huchin y col (2014) en un espectrofotómetro (GENESYS 10uv, Thermo Electron Corporation, Madison, EUA).

Los extractos se obtuvieron al agregar 10 mL de etanol al 80 % a 1 g de chayote, posteriormente se colocó en un mezclador serológico de vaivén (TTR-200, UNICO, EUA) por 10 min a temperatura ambiente y se centrifugó a $4000\times g$ por 10 min a 10 °C. Se recuperó el sobrenadante y se repitió el proceso para una segunda, tercera y cuarta extracción. El sobrenadante resultante de las posteriores extracciones se mezcló con el de la primera extracción, obteniéndose un total de 40 mL aproximadamente (extracto).

La determinación de fenólicos en el extracto se realizó agregando 125 μL del mismo, 125 μL de reactivo de Folin y 0.5 mL de agua destilada, se agitó durante un min en vórtex dejando reposar seis min, posteriormente se adicionaron 1250 μL de carbonato de sodio al 7 % y 1 mL de agua destilada, se agitó durante 30 s y se mantuvo en reposo durante 90 min, por último la absorbancia fue registrada a 760 nm ajustando el espectrofotómetro con el blanco sustituyendo el extracto con agua destilada.

Se elaboró una curva de calibración, mediante un stock de ácido gálico (1000 ppm), se prepararon estándares de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 ppm que se midieron con la misma metodología que para los extractos. Los resultados se expresaron como mg E.A.G. por 100 g s.s.

6 Parámetro enzimático

a Actividad de peroxidasa

La actividad de la enzima peroxidasa (POD) se determinó según el método descrito por Zhang y col (2005) con algunas modificaciones, basado en la reacción de oxidación de guayacol en presencia de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y la enzima para formar el compuesto coloreado tetraguayacol. La preparación del extracto consistió en medir 10 g de muestra,

adicionar 2 g de PVPP (Polivinilpolipirrolidona) y homogeneizar a 4 °C usando 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH=7). El extracto se mantuvo durante 2 h en oscuridad a 4 °C en un mezclador serológico de vaivén (TTR-200, Unico, EUA), posteriormente se filtró, se centrifugó a 11000×g por 25 min a 4 °C y enseguida se tomaron 10 mL del sobrenadante. La precipitación de la proteína se realizó al saturar el sobrenadante al 70 % con sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄], se mantuvo de nuevo durante 15 min en oscuridad a 4 °C en el mezclador serológico de vaivén, posteriormente se centrifugó a 11000×g por 25 min a 4 °C, se tomó el precipitado, al cual se le adicionaron 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH=7), previamente mantenido a 4 °C, y finalmente se obtuvo el extracto enzimático.

La mezcla del ensayo consistió en 2.7 mL de buffer de fosfato de sodio (0.2 M, pH = 6.5), 0.1 mL de H₂O₂ (0.1% v/v en agua), 0.15 mL de guayacol (4% v/v en agua) y 0.15 mL de extracto enzimático (López-López y col 2013). Se determinaron los cambios de absorbancia a 470 nm y 25 °C durante 3 min en lapsos de 10 s en un espectrofotómetro (GENESYS 10uv, Thermo Electron Corporation, Madison, EUA).

La actividad volumétrica (a_v) enzimática de la peroxidasa se calculó basándose en la pendiente de la porción lineal de la curva determinada a través de la cinética de reacción del gráfico de absorbancia (A) contra tiempo de reacción (t).

$$a_v = \frac{\left(\frac{\Delta A}{t}\right) V_T}{\epsilon l V_{Extr.}} \quad (15)$$

Donde:

$$\frac{\Delta A}{t} = \text{pendiente (min}^{-1}\text{) del gráfico absorbancia (A) contra tiempo (t).}$$

ε = coeficiente de extinción ($25.5 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$, reportado por Thongsook y Barrett 2005).

V_T = volumen total (mL).

$V_{\text{Extr.}}$ = volumen del extracto enzimático (mL).

l = espesor de la celda (cm).

7 Parámetros ingenieriles

a Conductividad térmica (k)

Se determinó utilizando el método de la fuente lineal de calor (Espinoza-Guevara y col 2010) donde la temperatura de ésta se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$T - T_1 = \frac{Q_L}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) \right] \quad (16)$$

La determinación de la conductividad térmica (k) se utilizó de forma análoga a la utilizada por Espinoza-Guevara y col (2010). La fuente lineal de calor (sonda) se insertó en el centro de las rodajas de chayote, hasta cubrir totalmente la sonda. Se equilibró a la temperatura de trabajo (25, 55 y 85 °C) sumergiéndolos en agua y aislándolas con películas plásticas para evitar penetración de humedad o lixiviación durante las determinaciones. Se colocó un termopar en la parte exterior para corroborar que no se presentó incremento de temperatura durante la prueba, lo cual es una condición para la confiabilidad del método, así como también se verificó que la intensidad de corriente no sufra variaciones durante la corrida. Se utilizó una intensidad de corriente (I) constante de aproximadamente 150 mA, la cual se registró con un multímetro a fin de calcular la potencia de la fuente lineal de calor. La longitud (L) de la sonda utilizada fue 14.3 cm y la resistencia (R) de aproximadamente 69.6 Ω . La temperatura de la

sonda se registró en función del tiempo, utilizando para ello un registrador de temperatura (OMB-DAQ-56, Data acquisition system, Omega Company, USA) y un software de cómputo (DaqView) para almacenar estos datos automáticamente en la computadora. Los registros de temperaturas se realizaron a intervalos de 5 s. En cada una de las determinaciones se descartó la primera lectura correspondiente a 5 s para asegurar que la sonda estuviese completamente energizada. Finalmente se efectuó un análisis de regresión entre la temperatura y el logaritmo natural del tiempo para obtener la pendiente con mejor ajuste.

El coeficiente k se obtiene de la pendiente de la recta ajustada

$$Pendiente = \frac{Q_L}{4\pi k} \quad (17)$$

Donde:

Q_L = Calor suministrado por unidad de longitud (W m^{-1})

k = Conductividad térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Donde la transferencia de calor Q_L se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$Q_L = \frac{I^2 R}{L} \quad (18)$$

Donde:

I = Intensidad de corriente (A).

R = Resistencia de la sonda (Ω).

L = Longitud de la sonda (m).

La conductividad térmica se obtuvo al despejar k de la ecuación (17).

b Densidad (ρ)

La densidad (ρ) se obtuvo mediante el desplazamiento de volumen (Tocci y Mascheroni 2008), utilizando tolueno como líquido desplazante. Para registrar la masa (5 g) se empleó una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), el tolueno y las muestras se ambientaron previamente a las temperaturas de trabajo (25, 55 y 85 °C) al sumergirlos en agua en un baño María (Modelo 9500, Fisher Scientific, EUA), para asegurar que las muestras se encontraran a la temperatura deseada se utilizó una muestra control a la cual se le introdujo un termopar tipo T y se determinó su temperatura con un registrador de temperatura (OMB-DAQ-56, Data acquisition system, Omega Company, USA) y un software de cómputo (DaqView), mientras que para el tolueno su temperatura se monitoreo con un termómetro, las muestras fueron cubiertas con película plástica para impedir la entrada de agua en los espacios vacíos del alimento. Se determinó el volumen del líquido desplazado al sumergir las muestras en una probeta que contuvo 50 mL de líquido desplazante, y mediante la siguiente expresión se determinó la densidad aparente.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (19)$$

ρ = densidad de la muestra (kg m^{-3}).

m = masa de la muestra (kg).

V = volumen de la muestra (m^3).

V_1 = volumen inicial del tolueno en la probeta (m^3).

V_2 = volumen final del tolueno en la probeta (m^3).

c Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica se obtuvo a las temperaturas del diseño experimental con el método de la fuente lineal de calor utilizando un analizador de propiedades térmicas (KD2 Pro Thermal Properties Analyzer) equipado con una sonda doble (SH-1) y se llevó a cabo una regresión no lineal con las siguientes ecuaciones para conocer b_0 y b_2 (Oladunjoye y Sanuade 2012).

$$T - T_0 = \frac{Q_L}{4\pi k} \left[b_0 k t + E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right] \quad (20)$$

$$T - T_0 = \frac{Q_L}{4\pi} \left[b_0 t + \frac{1}{k} E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) \right] \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{r^2}{4\alpha} \quad \alpha = \frac{r^2}{4b_2} \quad (22)$$

d Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica (C_p) se obtuvo de la siguiente ecuación (Geankoplis 1998):

$$\alpha = k / (\rho C_p) \quad (23)$$

Donde:

α = difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

k = conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

ρ = densidad (kg m^{-3})

C_p = capacidad calorífica específica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

e Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

Para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) se utilizó un cuerpo de aluminio en forma de rodaja (transversal) de chayote de 4 mm de espesor al cual se le introdujo un termopar a una profundidad de 2 mm.

La primera parte consistió en obtener las temperaturas experimentales durante el calentamiento y enfriamiento del aluminio en forma de rodaja de chayote. El procedimiento partió en llevar la rodaja a una temperatura inicial de 25 °C (T_0), posteriormente se colocó en el recipiente de cocción, el cual contuvo rodajas de chayote, generando un ambiente similar al proceso normal de cocción, con la finalidad de que la rodaja estuviera bajo las condiciones de cualquier otra. La temperatura del medio de calentamiento fue de 65 °C (T_∞) y se utilizó un registrador de temperaturas (OMB-DAQ-56, Data acquisition system, Omega Company, USA). La temperatura (T) se registró cada 5 s durante 12 min, de los cuales fueron 2 min de calentamiento a 65 °C y 10 min de enfriamiento en aire a 20 °C. Las historias de temperatura se obtuvieron colocando un termopar tipo T en el cuerpo de aluminio.

El método de parámetros concentrados supone que la geometría, el tamaño y la conductividad térmica de un material se combinan de tal forma que la temperatura en el interior del sólido cambia solamente con el tiempo, es decir, que la temperatura no es una función de la posición. Se cumple además, que el material tiene una resistencia interna despreciable, si se compara con la resistencia superficial externa, por esto, todos los puntos en el interior del sólido tendrán una temperatura uniforme en todo momento. Esto equivale a suponer que la conductividad térmica del material es muy elevada. Tenemos que (Geankoplis 1998):

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho C_p V} t\right)} \quad (24)$$

Se aplicó logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación (24) y se obtuvo:

$$\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right) = -\frac{hA}{\rho C_p V} t \quad (25)$$

Donde:

T_0 = temperatura inicial del sólido (°C).

T_{∞} = temperatura del fluido (°C).

A = área del sólido (m²).

V = volumen del sólido (m³).

ρ = densidad del sólido (kg m⁻³).

C_p = capacidad calorífica específica del sólido (J kg⁻¹ K⁻¹).

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor (W m⁻² K⁻¹).

Al cociente $\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ se le conoce como fracción de temperatura no alcanzada.

La ecuación $\ln\left[\frac{(T - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})}\right] = -\left[\frac{(hA)}{(\rho C_p V)}\right]t$ cumple con la forma general

$y = mx + b$ donde:

$$y = \ln\left[\frac{(T - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})}\right] \quad m = -\left[\frac{(hA)}{(\rho C_p V)}\right] \quad x = t \quad b = 0$$

De esta manera, se graficó $\ln\left[\frac{(T - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)}\right]$ contra t , una vez calculada la pendiente se despejó para obtener el coeficiente h como se muestra en la ecuación (26). El criterio que se sigue para la aplicación de este método es que $Bi \leq 0.1$ (Geankoplis 1998).

$$h = -m\rho C_p L \quad (26)$$

Donde:

m = pendiente.

ρ = densidad del aluminio (kg m^{-3}),

C_p = capacidad calorífica específica del aluminio ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

L = longitud característica que es el resultado de V/A (m).

8 Simulación de la transferencia de calor durante la cocción y enfriamiento

a Solución analítica para placa infinita

Las soluciones analíticas se encontraron matemáticamente al utilizar la serie infinita propuesta por Carslaw y Jaeger (1959) al analizar la transferencia de calor considerando a las rodajas de chayote como una placa infinita donde participan la resistencia interna y externa. Se utilizaron los parámetros termofísicos conductividad térmica (k), densidad (ρ), difusividad térmica (α) y capacidad calorífica específica (C_p) a la temperatura de trabajo, junto a la temperatura inicial (T_0), la temperatura del medio (T_∞), el semiespesor de la rodaja (L) y la posición (x) del termopar.

b Elemento finito

La simulación de la transferencia de calor se realizó utilizando el paquete computacional ANSYS (ANSYS/ED, versión 14.0), con la finalidad de obtener las historias de temperaturas estimadas. El procedimiento consistió en determinar las coordenadas de los puntos donde se colocaron los termopares en las hortalizas. Para ello se consideró un modelo geométrico tridimensional de rodajas transversales de chayote. Para modelar se utilizó un elemento en forma tetraedro de 10 nodos (Tet 10 node 87) (Zarabia-Salazar y col 2005).

Para simular la transferencia de calor por conducción en el interior de la rodaja de chayote se introdujeron los datos de conductividad térmica, capacidad calorífica específica y densidad aparente dependientes de la temperatura.

Para simular la transferencia de calor por convección, la temperatura inicial se consideró uniforme para todos los nodos. En la superficie externa de la sección modelada se aplicaron las condiciones de transferencia de calor por convección: Temperatura del agua (T_{∞}) y coeficiente convectivo (h) para calentamiento posteriormente se simuló el enfriamiento aplicando las condiciones temperatura del aire (T_{∞}) y coeficiente convectivo (h) para enfriamiento.

Para obtener las historias de temperatura, el programa se ejecutó a intervalos de 5 s durante 720 s. Para conocer la temperatura en los nodos de interés, se seleccionaron mediante sus coordenadas correspondientes y se procedió a realizar un listado de las temperaturas.

9 Predicción de la actividad remanente de peroxidasa

Se predice la historia de temperatura para el punto crítico mediante simulación con el método de elemento finito y se estima la letalidad del proceso que generalmente se expresa en min letales (Alvarado y col 2009).

$$F_{T_0} = \int_0^t 10^{\frac{T-T_0}{z}} dt = \left(\frac{1}{2} v_{L_0} + v_{L_1} + v_{L_2} + \dots + v_{L_{n-1}} + \frac{1}{2} v_{L_n} \right) \Delta t \quad (27)$$

La inactivación de la peroxidasa sigue una cinética de primer orden (López-Díaz 2018).

$$\log(a) = -\frac{1}{D_{T_0}} t_{T_0} + \log(a_i) \quad (28)$$

Donde a_i es la actividad inicial, a la actividad residual, D_{T_0} el tiempo de reducción decimal a T_0 y t_{T_0} el tiempo del proceso a T_0 . De aquí, el tiempo de proceso es:

$$t_{T_0} = D_{T_0} \log\left(\frac{a_i}{a}\right) \quad (29)$$

La letalidad, en min letales, a una temperatura de referencia T_0 indica el tiempo de proceso a esa temperatura de referencia T_0 :

$$F_{T_0} = t_{T_0} \quad (30)$$

Al combinar las ecuaciones se obtiene el cociente de actividad remanente:

$$\frac{a}{a_i} = 10^{-\frac{F_{T_0}}{D_{T_0}}} \quad (31)$$

Se calcula el porcentaje de actividad remanente de peroxidasa:

$$\% a_{res} = \frac{a}{a_i} (100 \%) \quad (32)$$

Para la peroxidasa, el tiempo de reducción decimal es $D_{T_0} = 2$ min a $T_0 = 70$ °C y la constante de resistencia térmica es $z = 13.9$ °C (López-Díaz 2018).

10 Métodos estadísticos

a Diseño experimental

Se utilizó un diseño central compuesto rotatable con dos factores, temperatura (80 a 90°C) y tiempo (2 a 6 min) con 5 niveles de variación para cada factor lo que da un total de 13 tratamientos (**Cuadro 4**) (Myers y Montgomery 1971; Montgomery y Jaime 1991).

b Optimización

Para optimizar las condiciones de proceso se empleó la metodología de superficie de respuesta (MSR), la cual consiste en un grupo de técnicas estadísticas y matemáticas, que permite conocer las mejores condiciones en que las variables de estudio rinden las respuestas más adecuadas, además ayuda en el modelado y el análisis de problemas en los que el objetivo es optimizar simultáneamente varias respuestas. La MSR determina el efecto de las variables de proceso, individual o de manera combinada, así se puede modelar y analizar problemas en los que la variable de interés es afectada por otras. Además, con esta metodología se ajustan los datos experimentales para generar modelos de predicción (Bas y Boyaci 2007).

c Análisis de datos.

Las variables de respuesta utilizadas fueron: retención de firmeza, diferencia total de color (ΔE), retención de ácido ascórbico, retención de compuestos fenólicos y actividad remanente de peroxidasa.

Cuadro 4. Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de cocción.

x_1 codificada	x_2 codificada	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
-1	-1	81.5	2.6
1	-1	88.5	2.6
-1	1	81.5	5.4
1	1	88.5	5.4
-1.41421	0	80.0	4.0
1.41421	0	90.0	4.0
0	-1.41421	85.0	2.0
0	1.41421	85.0	6.0
0	0	85.0	4.0
0	0	85.0	4.0
0	0	85.0	4.0
0	0	85.0	4.0
0	0	85.0	4.0

Se realizó el análisis de regresión a los datos experimentales obtenidos en cada una de las variables de respuesta antes mencionadas, donde los términos no significativos ($p > 0.05$) fueron descartados para determinar los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta y obtener modelos con mejor ajuste.

Los datos se analizaron con el software Desing Expert 7.0 y se obtuvieron los gráficos de superficie de respuesta (Pellegrini-Zurita 2017).

El modelado es una metodología que implica una representación matemática del comportamiento de un sistema. Si estas ecuaciones son precisas y reproducibles, posibilitan la estimación de las variables en diferentes escenarios de proceso y además, describen la forma en que los factores afectan a dichas respuestas. El modelado adecuado de los parámetros permitió realizar predicciones de dichas variables en el intervalo de las condiciones estudiadas.

Los modelos de predicción se consideraron adecuados y reproducibles si cumplían con cuatro condiciones: significancia p del modelo ($p < 0.05$), un coeficiente de determinación ajustado ($R_{ajust}^2 > 0.8$), coeficiente de variación ($C.V. < 10\%$) y que pase la prueba de falta de ajuste, con una significancia $p_{LOF} > 0.05$ (Milán-Carrillo y col 2002; Milán-Carrillo y col 2006).

Las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvieron mediante el método numérico. Dentro de los criterios empleados en la optimización del proceso, se consideró deseable: mayor retención de ácido ascórbico (% R_{AA}) y de compuestos fenólicos (% R_{CF}) y menor retención de firmeza (% RF), diferencia total de color (ΔE) y actividad remanente de peroxidasa (% ARP).

d Validación del modelo de predicción

Para la validación de los modelos matemáticos predichos por el software se realizaron corridas de confirmación utilizando 5 réplicas del proceso de cocción optimizado ($n = 5$). Se obtuvieron muestras a las cuales se les evaluaron las siguientes variables de respuesta: % *RF*, ΔE , % *RAA*, % *RCF* y % *ARP*. Se verificó que la media de cada variable de respuesta estuviera dentro del intervalo de confianza para las condiciones óptimas predichas por el modelo, determinando así el funcionamiento del mismo.

e Contraste del chayote cocido optimizado respecto al fresco

Para la comparación se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial completamente al azar con 2 niveles (fresco y cocido optimizado). Las variables de respuesta fueron: Firmeza, humedad, color, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, ácido ascórbico, compuestos fenólicos y actividad de peroxidasa. Se llevaron a cabo 3 réplicas de cada uno y para la comparación de medias de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (LSD) con un $\alpha = 0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS 5.0 (Pellegrini-Zurita 2017).

f Parámetros ingenieriles

Se utilizó un diseño completamente al azar de una sola vía (Montgomery y Jaime 1991), donde el factor fue la temperatura (25, 55 y 85 °C); las variables de respuesta fueron: conductividad térmica, densidad, difusividad térmica y capacidad calorífica específica. Se realizaron 3 réplicas. Se realizó un análisis de estadística descriptiva para el coeficiente convectivo y la actividad remanente de peroxidasa. En ambos se realizaron 3 réplicas; se reporta la media y su desviación estándar.

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL, FITOQUÍMICO Y ENZIMÁTICO DE RODAJAS DE CHAYOTE EN FRESCO.

1 Parámetros fisicoquímicos

a Firmeza

La firmeza obtenida para chayote fresco fue de 18.1 ± 2.1 N. Mejía-Doria y col (2016) reportan una firmeza de 27 N para chayote, valor superior al obtenido en este trabajo lo cual puede deberse a que la medición la realizaron en el producto entero tomando en cuenta la cáscara, mientras que en este trabajo se llevó a cabo directamente sobre las rodajas de chayote.

b Humedad

La humedad encontrada en este estudio para chayote fresco fue de 94.8 ± 0.1 %, lo cual concuerda con lo reportado por otros autores para esta hortaliza; 93 % reportado por Lira (1996), 94.3 % por Castro y col (2015), 94 % reportado por USDA (2016) y 93.2 % por Islam y col (2018).

c Color

Los parámetros de color obtenidos para rodajas de chayote fresco fueron $L^* = 66.2 \pm 0.9$, $a^* = -8.7 \pm 1.4$ y $b^* = 15.7 \pm 1.8$ lo que representa una coloración verde clara. Gajar y Badrie (2001) reportaron $L^* = 45.4$, $a^* = -5.3$ y $b^* = 7.9$, presentando coloraciones más ligeras y opacas. Mejía-Doria y col (2016) encontraron $L^* = 57.8$, $a^* = -2.9$ y $b^* = 11.5$, teniendo tonalidades tenues y menos luminosas, mientras que Peña y col (2017) obtuvieron $L^* = 60.7$, $a^* = -6.5$ y $b^* = 28.3$, lo que representa un color más amarillento debido a la magnitud del parámetro b^* . Estas ligeras variaciones en los parámetros de color se pueden deber a un gran

número de factores muy variados entre ellos destacan el estado de madurez, la variedad, así como a las condiciones de medición.

d pH

El pH obtenido para chayote fresco fue de 6.5 ± 0.1 , similar al 6.4 reportado por Gajar y Badrie (2001), 6.2 por Castro y col (2015), 6.5 por Mejía-Doria y col (2016) y 6.3 por Islam y col (2018). El pH puede variar debido principalmente a las condiciones de cultivo y al estado de madurez.

e Acidez titulable

Se obtuvo una acidez titulable de 0.075 ± 0.02 % para rodajas de chayote fresco que es mayor al 0.040 % reportado por Cadena y col (2011), al 0.050 por Mejía-Doria y col (2016) y al 0.030 % encontrado por Moreira (2018); estas variaciones pueden deberse al suelo de cultivo, el agua de riego, estado de madurez, manejo poscosecha, entre otros.

f Sólidos solubles totales

En chayote fresco el contenido de sólidos solubles totales obtenido fue de 4.0 ± 0.5 °Brix, similar a los 4.0 °Brix reportado por Gajar y Badrie (2001), resultó inferior a los 5.1 °Brix encontrado por Cadena y col (2011), y similar a los 4.0 °Brix publicado por Mejía-Doria y col (2016) y los 3.9 °Brix obtenido por Moreira (2018); estas diferencias se atribuyen principalmente al estado de madurez, así como al contenido de agua.

2 Parámetro nutrimental

a Ácido ascórbico

En rodajas de chayote fresco se obtuvieron 20.8 ± 3.2 mg A.A./100 g f.f. Lo cual se encuentra dentro del rango (11-20 mg A.A./100 g f.f.) publicado por Lira (1996) para chayote y resultó superior a los (7.7 mg A.A./100 g f.f.) reportado por USDA (2016) para dicha hortaliza; esto puede deberse al manejo y cuidado en la cosecha.

3 Parámetro fitoquímico

a Compuestos fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos encontrado para chayote fresco fue de 255.2 ± 6.5 mg E.A.G./100 g s.s. que cae dentro del rango (63-262 mg E.A.G./100 g s.s.) reportado por Chao y col (2014), así mismo resultó menor a los 554.4 mg E.A.G./100 g s.s. obtenido por Castro y col (2015) y a los 350.9 mg E.A.G./100 g s.s. encontrados por Peña y col (2017); dichas diferencias pueden deberse al estado de madurez y al método de extracción utilizado.

4 Parámetro enzimático

a Actividad de peroxidasa

La actividad volumétrica obtenida en chayote fresco fue de 0.26 ± 0.02 U/mL, la cual se encuentra dentro del rango (0.06-0.30 U/mL encontrado por Morales-Blancas y col (2002) para zanahoria y es superior al rango (0.11-0.14 U/mL) reportado en espárragos por los mismos investigadores, así mismo resultó menor a los 0.31 U/mL publicado por Iribe-Salazar y col (2015) en brócoli.

B MODELOS DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL, FITOQUÍMICO Y ENZIMÁTICO DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDAS.

1 Retención de firmeza (% *RF*)

En la **Figura 5** se presenta el gráfico de superficie de respuesta que muestra el efecto de la temperatura y tiempo de cocción sobre la retención de firmeza (% *RF*) en rodajas de chayote.

La firmeza disminuyó de manera lineal al aumentar la temperatura y el tiempo. El intervalo de retención de firmeza se halló entre 57.5 y 83.0 %. La máxima retención de firmeza se encontró en $T = 85\text{ °C}$ y $t = 2\text{ min}$ y la mínima en $T = 88.5\text{ °C}$ y $t = 5.4\text{ min}$. A continuación se muestra el modelo lineal de predicción:

$$\%RF = 69.17 - 5.47T - 5.99t$$

El estadístico F para el modelo, que fue de 33.87, implica que el modelo es significativo ($p < 0.0001$). El modelo no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.3535$), además, explicó el 87.6 % de la variación total de los datos y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (4.0 %), por lo que se puede considerar que el modelo es adecuado y reproducible.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Abu-Ghannam y Crowley (2006) así como Mendoza y Herrera (2012) quienes estudiaron la firmeza en papa observando una disminución de la misma al incrementar los tiempos y temperatura de cocción, además, Goncalves y col (2010) reportan un comportamiento similar en cuanto a la tendencia en zanahoria al disminuir su firmeza cuando se aumentan la temperatura y el tiempo.

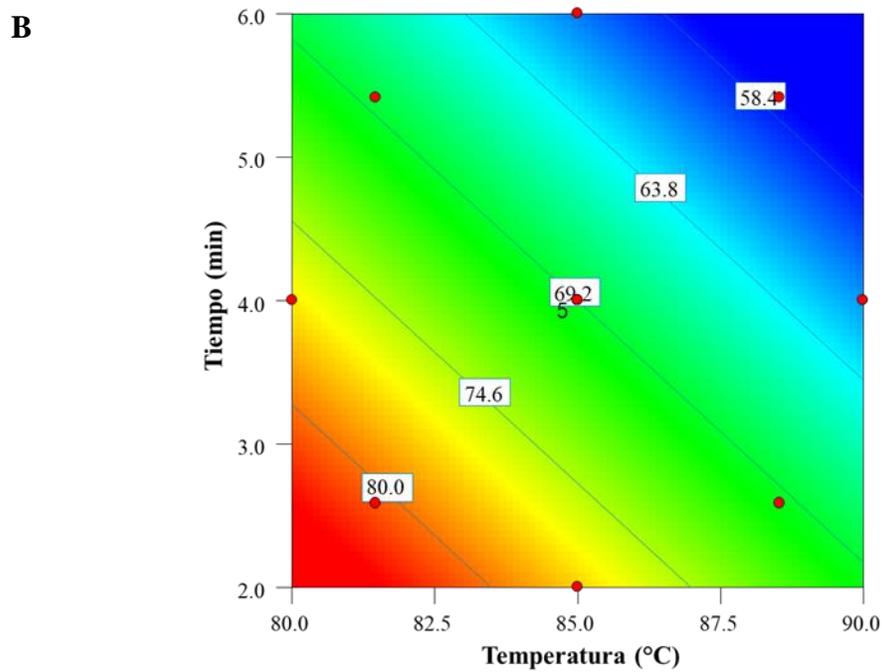
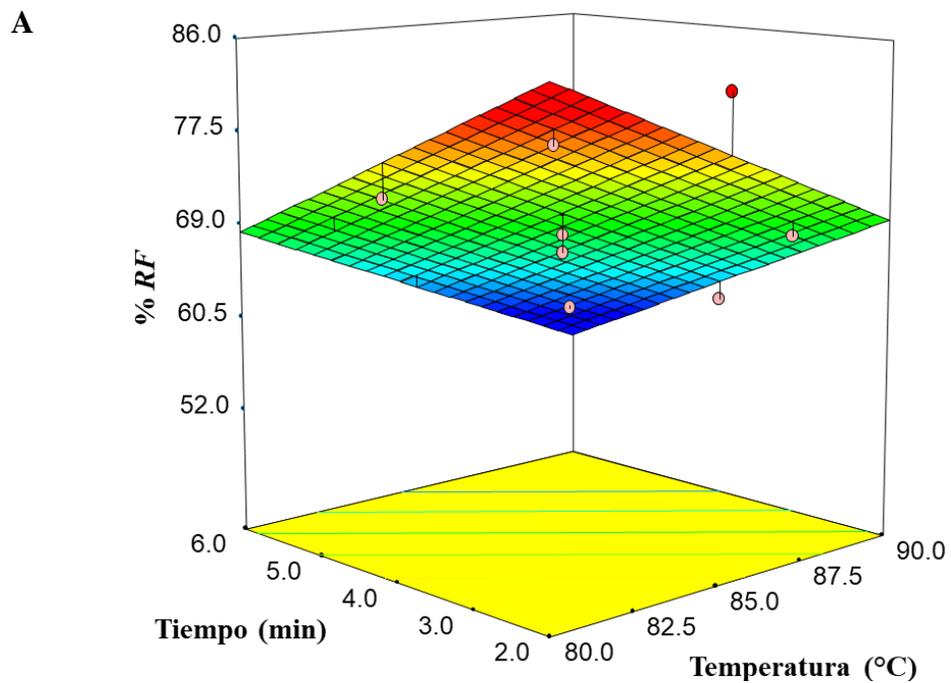


Figura 5. Efecto del tiempo y temperatura de cocción sobre la retención de firmeza (% *RF*) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.

La retención de firmeza (% *RF*) disminuye al aumentar la temperatura y el tiempo ya que el tratamiento térmico afecta la textura de los alimentos. El impacto térmico causa el rompimiento de las membranas celulares, lo que permite la difusión de agua y moléculas de bajo peso, lo que resulta en pérdida de firmeza. Sin embargo, el ablandamiento más significativo se produce como resultado de un aumento en la solubilización de las sustancias pécticas, pérdida de presión del turgor y cierto grado de separación celular (Goncalves y col 2007).

2 Diferencia total de color (ΔE)

En la **Figura 6** se muestra el comportamiento de ΔE a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología para las rodajas de chayote. Se observa un comportamiento lineal respecto a la temperatura y el tiempo, la magnitud de la respuesta aumenta al incrementar ambos factores.

Las ΔE más elevadas se presentan en las tonalidades rojas con temperaturas altas y tiempos largos, mientras que en las tonalidades azules se encuentran las ΔE más bajas con temperaturas bajas y tiempos cortos. Los datos experimentales se hallaron en un rango de 5.5 a 9.0. El modelo de predicción resultó de primer orden y fue el siguiente:

$$\Delta E = 7.28 + 1.19T + 0.48t$$

El estadístico *F* para el modelo (73.75) implica que el modelo es significativo ($p < 0.0001$), su coeficiente de variación fue de 4.1 % menor al 10 % recomendado, además, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.27$) y explicó el 93.7 % de la dispersión experimental, por lo que se considera que dicho modelo es adecuado y reproducible.

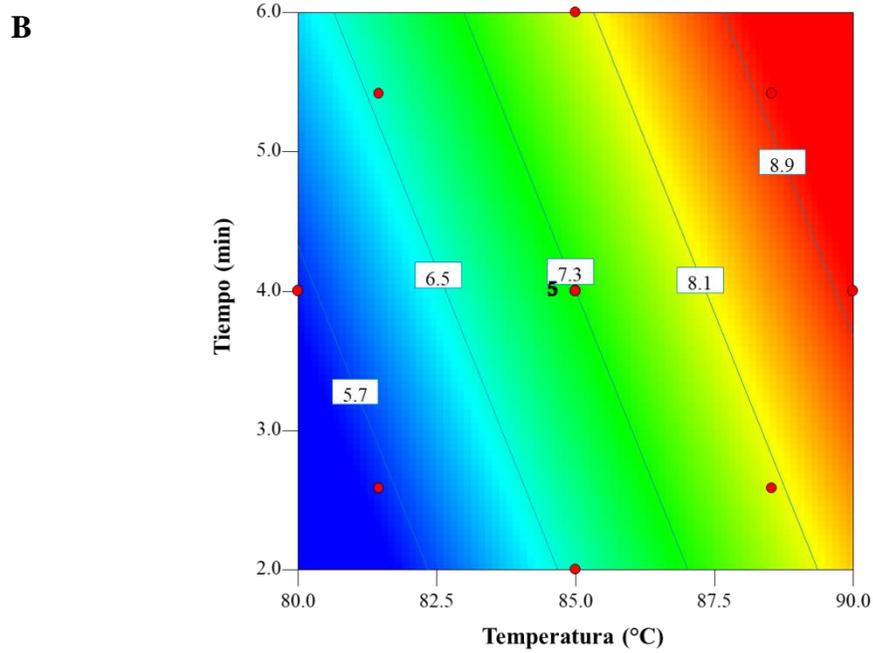
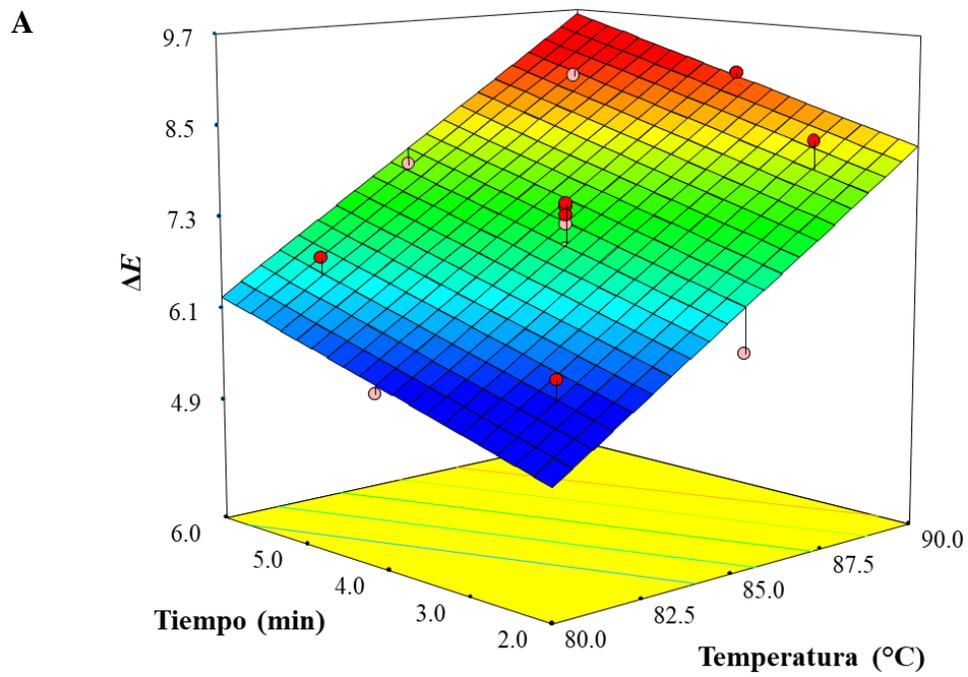


Figura 6. Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE , respecto al fresco) después de la cocción de rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.

Muftugil (1986) obtuvo una ΔE (11.2) para ejotes cocidos por 3 min a 100 °C, dicho resultado es similar al reportado en este estudio ya que sus tiempos de procesamiento caen dentro del rango utilizado en este trabajo. Pellegrini y col (2010) encontraron una ΔE de 12.8 para brócoli, 9.9 para col de bruselas y 11.3 para coliflor, escaldados a 100 °C por 8, 10 y 10 min respectivamente, resultando superiores a lo hallado en este estudio.

Peña y col (2017) reportan una diferencia total de color de 18.1 en chayote cocido a 100 °C durante 30 min, lo cual resulta superior al rango encontrado en este estudio ya que en ese estudio se trabajó con temperaturas y tiempos mayores.

El color es de gran importancia ya que influye directamente en la aceptación de los alimentos, además, es la primera característica que el consumidor percibe del producto. Es deseable que el color de un fruto procesado sea lo más similar posible al fresco, puesto que es un factor altamente dependiente para la aceptación del producto (Goncalves y col 2007; Peña y col 2017).

El color verde de los vegetales está relacionado con el contenido de clorofila y la disminución de la coloración verde está asociada con la formación de feofitina (verde-grisácea) por el intercambio de Mg^{2+} por H^+ en el centro del anillo porfirínico del pigmento. La clorofila se degrada por hidrólisis y oxidación, durante la cocción, la conversión aumenta cuando se incrementa el tiempo, además, al incrementar la temperatura se acelera esta degradación (Muftugil 1986; Pellegrini y col 2010).

3 Retención de ácido ascórbico (% RAA)

En la **Figura 7** se presentan los gráficos para el parámetro nutricional de retención de ácido ascórbico (% RAA) de rodajas de chayote cocidas. Se observa un comportamiento lineal

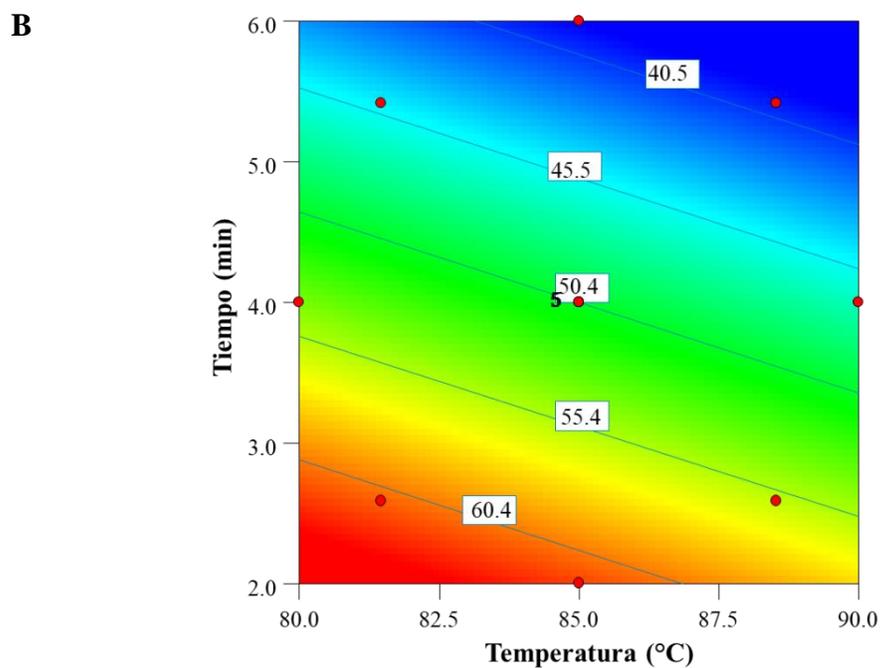
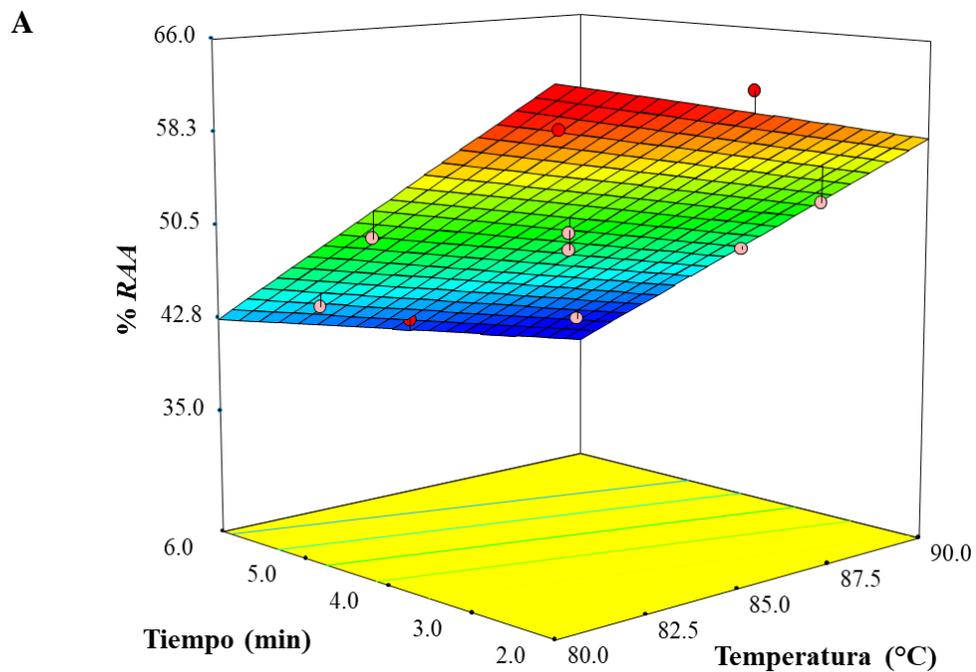


Figura 7. Efecto de la temperatura y el tiempo de cocción sobre la retención de ácido ascórbico (% RAA) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.

inversamente proporcional ya que a medida que la temperatura se incrementa, la *RAA* disminuye, de manera similar a lo que ocurre al aumentar el tiempo de procesamiento. La *RAA* se encontró en un rango de 39.2 hasta 63.4 %.

Se obtuvo un modelo de predicción con tendencia lineal para el tiempo y temperatura, el cual se muestra a continuación:

$$\%RAA = 50.45 - 2.56T - 7.95t$$

El estadístico *F* para el modelo, 52.0, implica que el modelo es significativo ($p < 0.0001$), dicho modelo explicó el 91.2 % de la variabilidad de los datos experimentales, su coeficiente de variación fue menor al 10 % recomendado ($C.V. = 4.6\%$) y no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.75$), obteniéndose un modelo adecuado y reproducible.

Selman (1994) encontró un comportamiento similar al disminuir el % *RAA* en escaldado de ejotes cuando se aumentan las condiciones de procesamiento. Mientras que Yamaguchi y col (2001) reportan % *RAA* de 7, 25, 24 y 12 para espárrago, brócoli, zanahoria y calabaza, respectivamente, tras una cocción de 5 min a 100 °C, resultando inferiores al rango encontrado en este estudio, ya sea por el tipo de hortaliza o las diferencias en las condiciones de procesamiento. Agüero y col (2007) obtuvieron altas retenciones de ácido ascórbico aún con altas temperaturas si los tiempos de procesamiento son cortos, obteniendo para calabaza una *RAA* de 72 % al ser procesada a 90 °C durante 0.13 min. Concordando con lo encontrado en el modelo al tener un mayor efecto el tiempo de cocción.

La pérdida del ácido ascórbico durante el tratamiento térmico en agua puede atribuirse a su alta solubilidad presentándose la lixiviación del mismo por los tiempos prolongados de proceso y a que este nutrimento no es estable a altas temperaturas (Cruz y col 2008).

4 Retención de compuestos fenólicos (% *RCF*)

La retención de compuestos fenólicos (*RCF*) de las rodajas de chayote cocidas se presenta en la **Figura 8**. Visualmente se puede notar el efecto cuadrático de la temperatura y el tiempo sobre la respuesta

Se observa que el % *RCF* aumenta ligeramente al incrementar la temperatura, mientras que al acrecentar el tiempo la respuesta aumenta hasta llegar a un máximo y después disminuye al prolongar el tiempo de procesamiento. Las mayores *RCF* se presentan en las tonalidades rojas, y los menores en las azules. Los datos experimentales obtenidos estuvieron entre 47.5 y 81.0 %. El modelo obtenido resultó de segundo orden y se presenta a continuación:

$$\%RCF = 72.38 + 1.89T + 2.36T^2 - 11.92t^2$$

El estadístico *F* para el modelo (112.29) implica que el modelo es significativo ($p < 0.0001$). Se encontró que el modelo matemático sigue un orden cuadrático, sin significancia del tiempo lineal ni la interacción de los factores, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.49$), explicó 97.4 % de la dispersión experimental y su coeficiente de variación fue de 2.8 %, por lo que se considera adecuado y reproducible.

Turkmen y col (2005) encontraron una *RCF* de 60 % en la cocción de calabaza a 100 °C durante 5 min, lo cual se encuentra dentro del rango encontrado en este estudio. Además, Goncalves y col (2010) obtuvieron un comportamiento similar al de este trabajo al observar que los compuestos fenólicos disminuyen cuando se aumenta el tiempo y la temperatura de cocción en zanahorias.

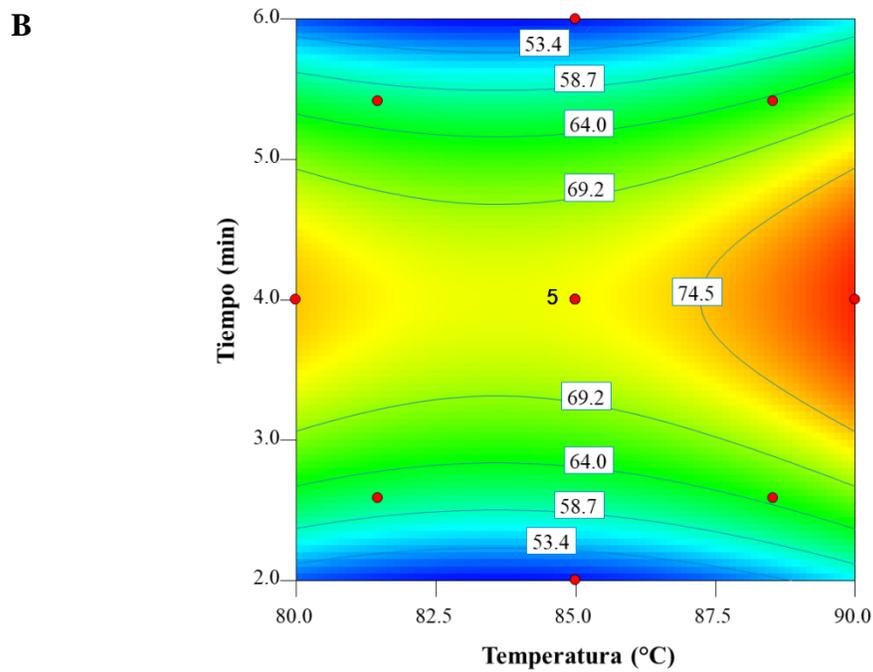
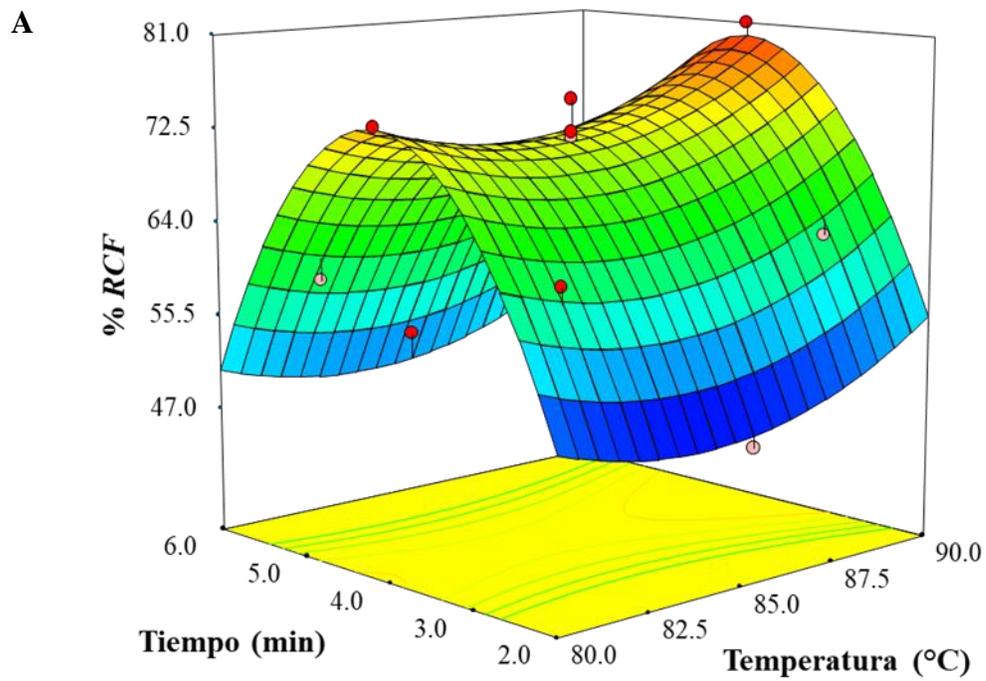


Figura 8. Efecto del tiempo y temperatura de procesamiento sobre la retención de compuestos fenólicos (% RCF) de rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.

Loizzo y col (2016) reportan una retención de compuestos fenólicos de 41 % en chayote cocido por 30 min a 100 °C, inferior al rango anteriormente mencionado lo que puede deberse a los tiempos de procesamiento tan prolongados.

Los compuestos fenólicos se clasifican en solubles e insolubles (ligados), en el chayote los presentes son los solubles. Zhang y Hamauzu (2004) así como Turkmen y col (2005) reportan que después del cocimiento estos compuestos se reducen significativamente, la pérdida puede deberse al rompimiento de los mismos o a la lixiviación, ya que son inestables al calor y muy solubles. Entendiéndose el aumento de la respuesta por la liberación de fenólicos presentes en la pared celular y su posterior disminución atribuida a la destrucción de los mismos por el procesamiento térmico.

5 Actividad remanente de peroxidasa (% ARP)

El comportamiento de la actividad remanente de peroxidasa (% ARP) de rodajas de chayote cocidas se muestra en la **Figura 9**. La ARP se encontró en un rango entre 32.7 y 73.5 %, encontrándose la actividad más grande a temperatura baja (81.5 °C) con tiempo corto (2.6 min) en la zona roja y la menor a temperatura alta (88.5 °C) con tiempo prolongado (5.4 min) en la zona azul siguiendo un comportamiento lineal. El modelo de predicción resultó lineal y se muestra a continuación:

$$\%ARP = 52.69 - 11.9T - 8.08t$$

El estadístico *F* para el modelo, que fue de 48.62, implica que el modelo es significativo ($p < 0.0001$), el modelo de predicción explicó el 90.7 % de la variabilidad de los datos, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.32$) y tuvo un coeficiente de variación de 7.8 % menor al máximo establecido (10 %), con lo que el modelo se consideró adecuado y reproducible.

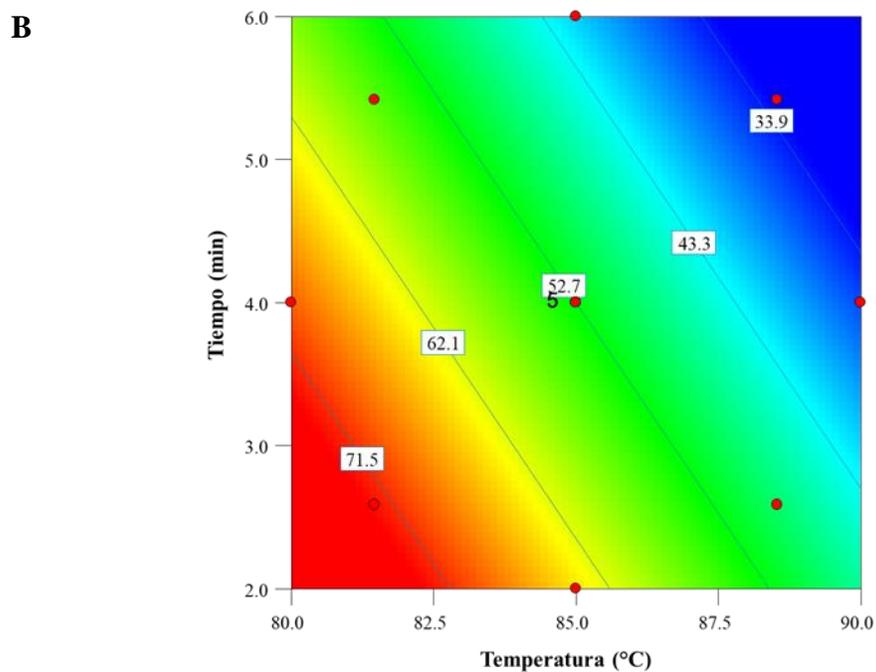
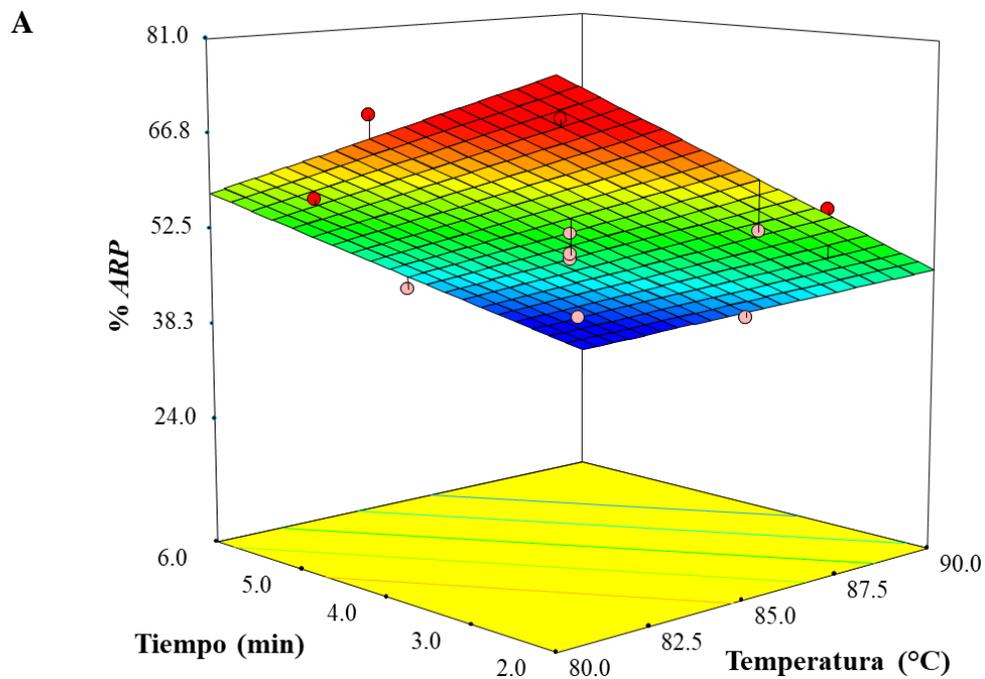


Figura 9. Efecto de la temperatura y el tiempo de cocción sobre la actividad remanente de peroxidasa (% ARP) en rodajas de chayote, superficie de respuesta A y contornos B.

Goncalves y col (2007) señalan una tendencia a disminuir la actividad enzimática de calabaza al aumentar la temperatura y el tiempo de escaldado, de igual manera Goncalves y col (2010) encontraron una tendencia similar en zanahoria, aminorando la *ARP* cuando se elevan las temperaturas y prolongan los tiempos de procesamiento.

Mendoza y Herrera (2012), así como Ricse y Cueva (2017) reportaron una disminución de la actividad enzimática en papa al incrementar las temperaturas y tiempos de cocción.

Se ha encontrado que con los tratamientos térmicos se presenta una considerable disminución de la actividad enzimática debido a la desnaturalización de su estructura proteínica, la peroxidasa con su estructura terciaria es desplegada, lo que lleva a la pérdida de su sitio activo y a no llevar a cabo la reacción en el medio celular (Ganjloo y col 2011; Mendoza y Herrera 2012).

Al disminuir el % *ARP* en esta investigación hasta aproximadamente 33 % se logra conservar el alimento pudiendo retrasar su senescencia y disminuir cambios en las propiedades sensoriales.

C MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDAS

1 Optimización del proceso de cocción

Una vez obtenidos los modelos de predicción, los resultados de las condiciones más apropiadas de procesamiento se obtuvieron al aplicar los siguientes criterios. Cada variable de respuesta recibió un objetivo deseable en el producto terminado, los criterios fueron: mayor retención de ácido ascórbico y de compuestos fenólicos, también se estableció una menor retención de firmeza, diferencia total de color y actividad remanente de peroxidasa. El criterio

de importancia fue: a la ΔE se le otorgó una menor importancia (+) que a las otras variables de respuesta (+++ para % RF , % RAA , % RCF y % ARP , que es la importancia por defecto; la mayor es 5 signos +). Respecto al criterio de ponderación, a la ΔE se le dio una menor ponderación (0.1) que a las otras variables de respuesta (a las otras cuatro respuestas se les dio una ponderación de 1). Se les asignan ponderaciones a las variables de respuesta durante la optimización para dar mayor o menor énfasis al objetivo deseable (mínimo o máximo). Con una ponderación de 1, la deseabilidad individual de la respuesta variará de 0 a 1 en forma lineal. Las ponderaciones mayores a 1 (la ponderación máxima es 10) proporcionan mayor énfasis al objetivo deseable. Las ponderaciones menores a 1 (la ponderación mínima es 0.1), dan menor énfasis al objetivo deseable (mínimo o máximo).

Para la optimización de la cocción, las deseabilidades individuales de cada variable de respuesta y deseabilidad global se presentan en la **Figura 10**.

A pesar de que la deseabilidad individual del porcentaje de retención de ácido ascórbico (% RAA) fue bajo (0.434), la deseabilidad global fue de 0.678, el cual acorde con Carrera (1998), proporciona un producto aceptable dentro de la escala subjetiva reportada. Diferentes autores (Anthon y col 2002; Schoeninger y col 2014) consideran que debido a que los alimentos son estructuras complejas, una deseabilidad entre 0.6 y 0.8, es aún aceptable.

Las condiciones óptimas de procesamiento para la cocción de rodajas de chayote fueron una temperatura de 88.5 °C y un tiempo de 3.7 min.

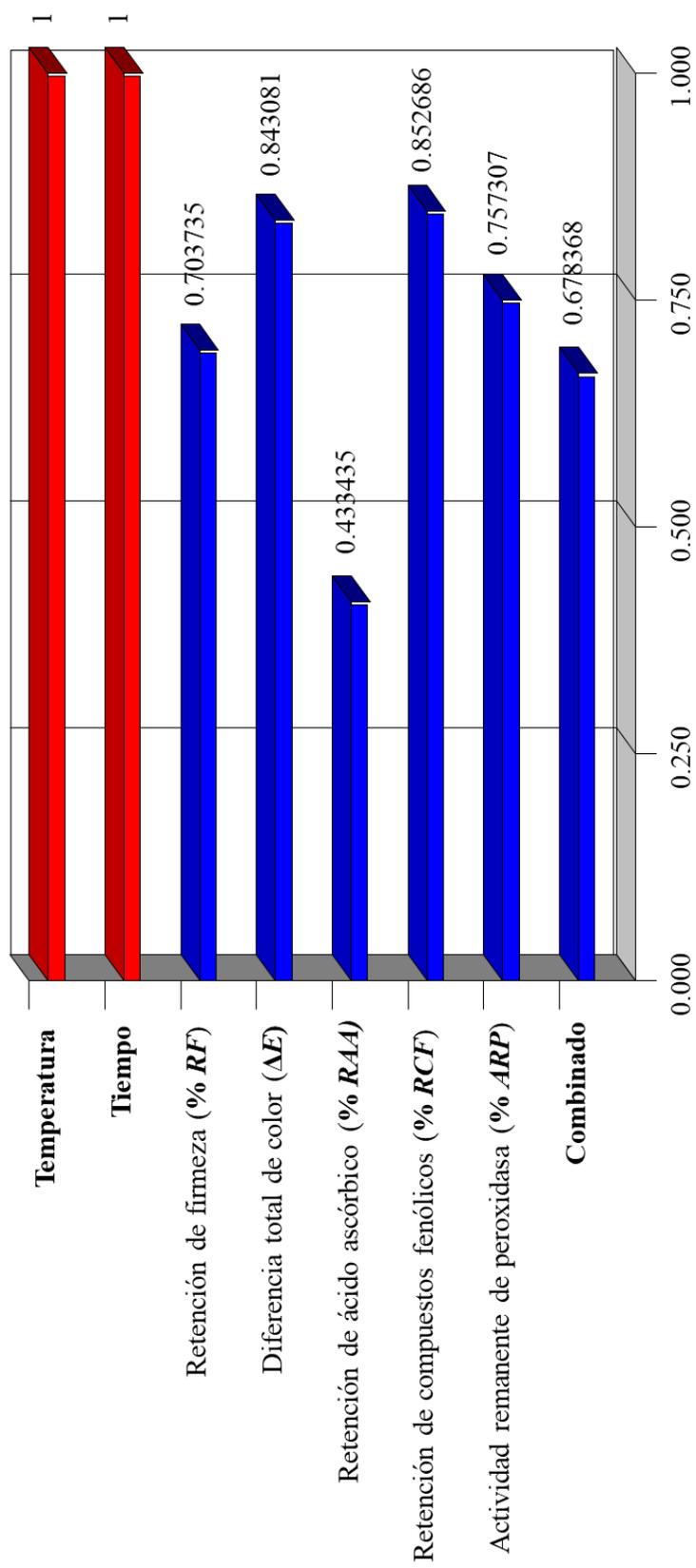


Figura 10. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas del proceso de cocción de rodajas de chayote.

2 Validación de los modelos de predicción

En el **Cuadro 5** se muestran las variables de respuesta experimentales y predichas para la validación del modelo matemático de la cocción de rodajas de chayote utilizando las condiciones óptimas de los factores. Las variables experimentales presentadas en el cuadro representan la media de 5 mediciones para cada variable de respuesta, además junto a la media se reporta la desviación estándar.

Se observa que la media experimental para cada variable de respuesta se encuentra dentro del rango predicho por el modelo, incluso para % *ARP*, que es la variable que presentó mayor coeficiente de variación (7.8 %). Se puede considerar que los modelos son buenos y reproducibles.

Un modelo matemático adecuado permite realizar predicciones de las variables de respuesta de manera teórica en el intervalo de temperatura y tiempo estudiados, es decir, se estima un intervalo de confianza para la variable, en el cual, si la cocción se realiza con las condiciones de los factores optimizados, la variable de respuesta experimental se encontrará dentro de dicho intervalo con cierto grado de confianza.

Cuadro 5. Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en rodajas de chayote cocidas en condiciones optimizadas.

Variable	Experimental	Exacto	Mínimo	Máximo
% <i>RF</i>	65.5 ± 2.4	65.0	62.2	67.9
ΔE	8.3 ± 0.6	8.4	8.1	8.7
% <i>RAA</i>	50.2 ± 2.7	49.7	47.3	52.0
% <i>RCF</i>	76.0 ± 2.2	76.0	73.9	78.1
% <i>ARP</i>	42.5 ± 3.3	42.6	38.4	46.8

D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTALES, FITOQUÍMICOS Y ENZIMÁTICOS DE RODAJAS DE CHAYOTE COCIDO OPTIMIZADO RESPECTO AL FRESCO

En el **Cuadro 6** se presentan los datos experimentales de las variables de respuestas fisicoquímicas (firmeza, humedad, color, pH, acidez titulable y sólidos solubles totales), nutricional (ácido ascórbico), fitoquímica (compuestos fenólicos) y enzimática (peroxidasa) en rodajas de chayote frescas y cocidas en condiciones optimizadas.

En dicho cuadro se puede observar si existe diferencia significativa de la variable de respuesta en chayote cocido optimizado respecto a las rodajas frescas.

1 Parámetros fisicoquímicos

a Firmeza

La firmeza obtenida en las rodajas de chayote cocidas optimizadas fue de 12.1 N la cual resultó significativamente menor a la firmeza obtenida en fresco. Esto se atribuye a que la temperatura destruye paredes celulares y degrada pectinas afectando la textura del fruto (Beaulieu y Gorny 2002), asimismo al ser un tratamiento en agua se puede dar lixiviación provocando el debilitamiento de la estructura (Rivera-López y col 2005).

b Humedad

En la cocción optimizada de rodajas de chayote se obtuvo una humedad de 95 % la que es mayor significativamente respecto a la humedad del producto fresco. Esto puede atribuirse a que, al ser sometida en un proceso de cocción en agua, una pequeña cantidad puede ser atrapada en la matriz resultando en un mayor contenido de humedad.

Cuadro 6. Comparación de las variables fisicoquímicas, nutrimental, fitoquímica y enzimática de rodajas de chayote cocido optimizado respecto al fresco.

Variable	Fresco	Óptimo	LSD
Firmeza (N)	18.4 ± 1.2 ^a	12.1 ± 0.4 ^b	1.32
Humedad (%)	94.8 ± 0.1 ^a	95.0 ± 0.1 ^b	0.17
Color	$L^* = 66.2 \pm 0.9^a$ $a^* = -8.7 \pm 1.4^a$ $b^* = 15.7 \pm 1.8^a$	$L^* = 61.6 \pm 0.8^b$ $a^* = -7.4 \pm 2.1^a$ $b^* = 12.0 \pm 2.5^b$	0.99 1.90 2.36
pH	6.5 ± 0.1 ^a	6.9 ± 0.1 ^b	0.09
Acidez titulable (% Ácido cítrico)	0.075 ± 0.02 ^a	0.049 ± 0.02 ^a	0.03
SST (° Brix)	4.0 ± 0.5 ^a	3.0 ± 0.2 ^b	0.59
Ácido ascórbico (mg A.A. / 100 g f.f.)	20.8 ± 3.2 ^a	10.5 ± 0.6 ^b	3.27
Compuestos fenólicos (mg E.A.G. / 100 g s.s.)	255.2 ± 6.5 ^a	224.4 ± 6.7 ^b	11.36
Peroxidasa (U / mL)	0.26 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.01 ^b	0.02

Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (Fisher, $p \leq 0.05$).

c Color

Los parámetros de color L^* , a^* y b^* obtenidos para rodajas de chayote cocidas optimizadas fueron de 61.6, -7.4 y 12 respectivamente. Los parámetros L^* y b^* de las rodajas cocidas optimizadas resultaron significativamente menores a los parámetros de las rodajas frescas mientras que en el parámetro a^* no hubo diferencia significativa. Al disminuir el parámetro L^* indica una pérdida de luminosidad volviendo las rodajas ligeramente más opacas y la disminución de b^* presenta una disminución de la coloración amarilla, esto se explica con lo mencionado anteriormente ya que el tratamiento térmico degrada la clorofila en feofitinas que poseen un color verde-grisáceo, provocando la disminución de luminosidad (Muftugil 1986; Pellegrini y col 2010).

d pH

Se obtuvo un pH de 6.9 para las rodajas de chayote cocidas optimizadas el cual resultó significativamente mayor al de las rodajas frescas, este puede ser modificado por el pH del agua de cocción, además, concuerda con lo estudiado por Peña y col (2017) quienes destacan que después del procesamiento se aumenta el pH hacia la neutralidad en comparación con el producto fresco.

e Acidez titulable

Se encontró que no hubo diferencia significativa en la acidez titulable de chayote fresco y el cocido optimizado concluyéndose que el tratamiento térmico en agua no afectó este parámetro.

f Sólidos solubles totales (SST)

Los sólidos solubles totales disminuyeron significativamente al comparar las rodajas de chayote cocidas optimizadas respecto a las frescas, lo cual puede atribuirse a que al ser un tratamiento en agua se puede presentar lixiviación pudiendo haber pérdida de compuestos hidrosolubles lo que explicaría que este parámetro disminuya.

2 Parámetro nutrimental

a Ácido ascórbico

En el **Cuadro 6** se observa una disminución significativa del ácido ascórbico en las rodajas de chayote cocido optimizado respecto al fresco, esto se puede deber a que, al ser tratado térmicamente en agua, este nutrimento se pierde por su solubilidad en agua e inestabilidad a altas temperaturas (Cruz y col 2008), sin embargo, se conserva cerca del 50 % de ácido ascórbico aún después del tratamiento.

3 Parámetro fitoquímico

a Compuestos fenólicos

Se encontró un contenido de fenólicos en rodajas de chayote cocido optimizado de 224.4 mg E.A.G./100 g s.s. el cual es significativamente menor al del fresco, esta disminución puede deberse a lo mencionado con anterioridad ya que la cocción provoca la pérdida de estos compuestos ya sea por su solubilidad o inestabilidad térmica (Azizah y col 2009).

4 Parámetro enzimático

a Actividad de peroxidasa

La actividad enzimática de la peroxidasa tuvo una disminución significativa al comparar las rodajas de chayote cocido optimizado respecto al fresco, lo cual es considerado deseable ya que permite la conservación del alimento, esta disminución es gracias al tratamiento térmico ya que al emplear altas temperaturas permite la desnaturalización de la enzima logrando que pierda su función (Mendoza y Herrera 2012).

E EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INGENIERILES EN LA COCCIÓN DE RODAJAS DE CHAYOTE

1 Conductividad térmica (k)

En la **Figura 11** se presentan la conductividad térmica de rodajas de chayote como función de la temperatura. En ella es posible observar que la conductividad térmica se incrementa linealmente conforme aumenta la temperatura. La conductividad para las rodajas de chayote estuvo en el rango de $0.566 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 25 °C hasta $0.760 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 85 °C , con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97 lo que indica un buen ajuste lineal y el modelo de predicción para esta variable fue:

$$k = 0.4749 + 0.0032T$$

La conductividad térmica a temperatura ambiente obtenida en esta investigación es similar a lo reportado para otras hortalizas como $0.605 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para zanahoria, $0.501 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para calabaza y $0.610 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ en papa (Sweat 1986; Rao y col 1975 y Maroulis y col 2002).

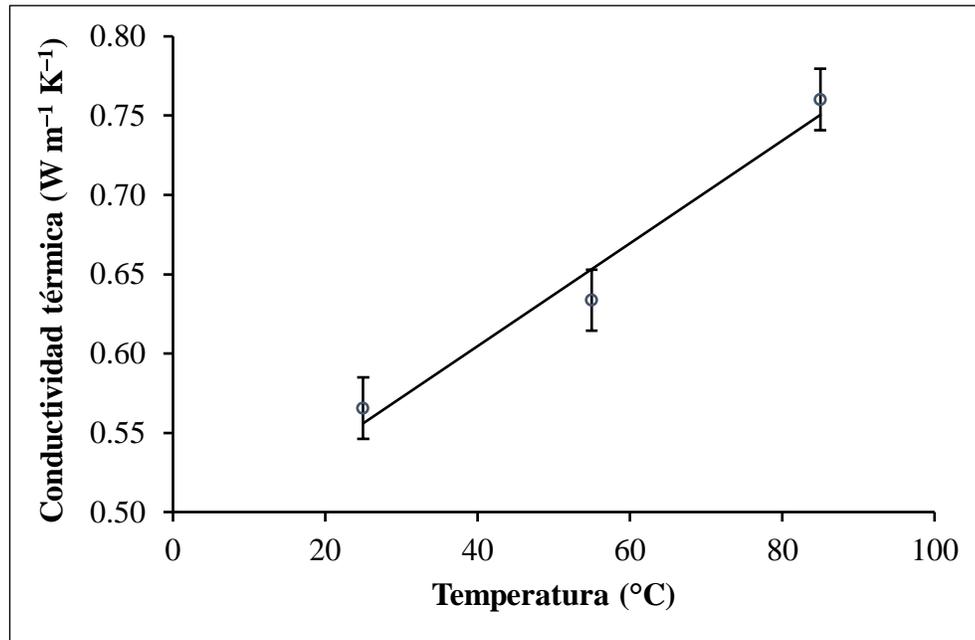


Figura 11. Conductividad térmica (k) para rodajas de chayote en función de la temperatura. (LSD = $0.039 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

Swenson (2007) reportó una conductividad de $0.598 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para chayote al trabajar en un intervalo de 31 a 41 °C lo cual es similar a lo obtenido con la ecuación de predicción si se trabajara con 41 °C ($0.606 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Espinoza-Guevara y col (2010) así como Iribe-Salazar y col (2015), encontraron una tendencia a aumentar la conductividad térmica cuando se aumenta la temperatura de procesamiento al trabajar con diferentes hortalizas.

Moreira (2018) experimentó con chayote utilizando la metodología empleada en este trabajo, y reportó una conductividad de $0.267 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente ($\approx 21 \text{ °C}$) la cual resulta inferior a lo encontrado en este estudio.

Alvarado (2014) explica que las variaciones en la conductividad térmica pueden deberse a la temperatura, la composición química, así como la porosidad del producto.

2 Densidad (ρ)

El efecto de la temperatura sobre la densidad aparente de chayote se observa en la **Figura 12**, se puede apreciar que la densidad disminuyó a medida que se aumentó la temperatura de la muestra en los niveles estudiados. La densidad aparente se encontró en un rango de 1013 a 782 kg m^{-3} con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99 y el modelo de predicción fue:

$$\rho = 1106 - 3.8566T$$

Rao y col (1975) señalan a 24 °C una ρ de 940 kg m^{-3} para calabaza, por su parte Alzate (2003) reporta densidades para zanahoria y papa de 1040 kg m^{-3} a 28 °C y 25.5 °C respectivamente. Estos reportes concuerdan con lo encontrado en este estudio para chayote a 25 °C.

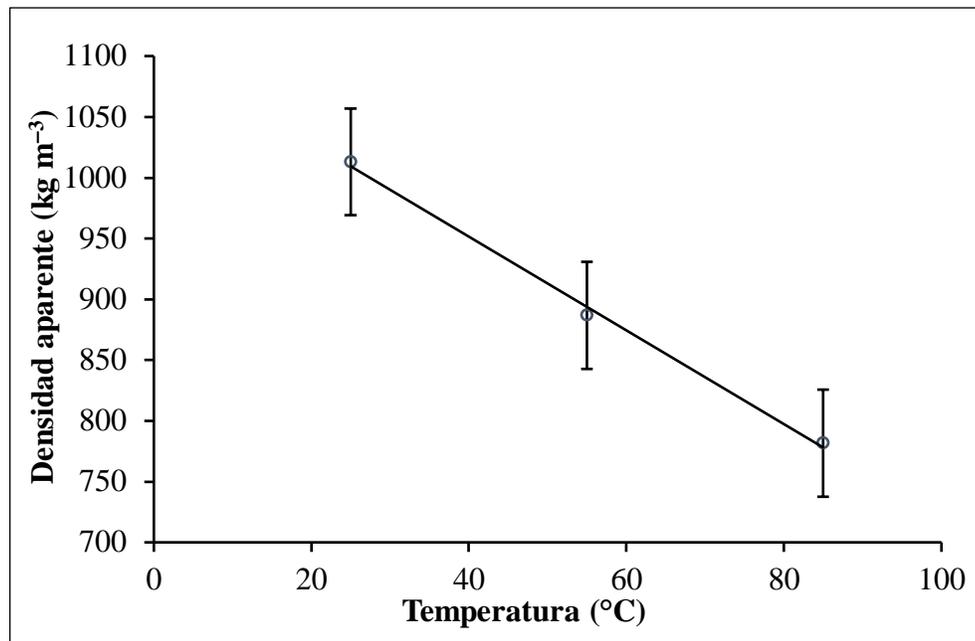


Figura 12. Densidad (ρ) para rodajas de chayote en función de la temperatura. (LSD = 88 kg m⁻³, $\alpha = 0.05$).

Moreira (2018) encontró una densidad en chayote a temperatura ambiente de 1003 kg m^{-3} , la cual resultó similar a la encontrada en este trabajo a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Alvarado (1998) señala que la densidad se ve influenciada significativamente por la temperatura y la humedad. Así, el contenido de humedad en los productos alimenticios afecta en gran medida a la densidad; la humedad a su vez, está influenciada por varias causas como el estado de madurez al momento de la cosecha.

3 Difusividad térmica (α)

En la **Figura 13** se muestra el comportamiento de la difusividad térmica de rodajas de chayote en función de la temperatura, este parámetro se encontró en un intervalo de 1.39×10^{-7} a $2.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ lo cual cae dentro del rango reportado para alimentos, se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.91, el modelo de predicción encontrado fue:

$$\alpha = 9 \times 10^{-8} + 2 \times 10^{-9} T$$

Alvarado (1994) señaló a temperatura ambiente una difusividad térmica de $1.32 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la pulpa de pepino, fruto que pertenece a la familia del chayote (*Cucurbitaceae*), Magee (1995) reporta una α para papa a temperatura ambiente de $1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, Alzate (2003) encontró una α en manzana de $1.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Vidaurre-Ruiz y Castañeda-Muñoz (2014) obtuvieron una difusividad térmica en el rango de 1.45×10^{-7} a $1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para calabaza en condiciones de 20 a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ de procesamiento, observando un incremento de este parámetro al aumentar la temperatura de trabajo.

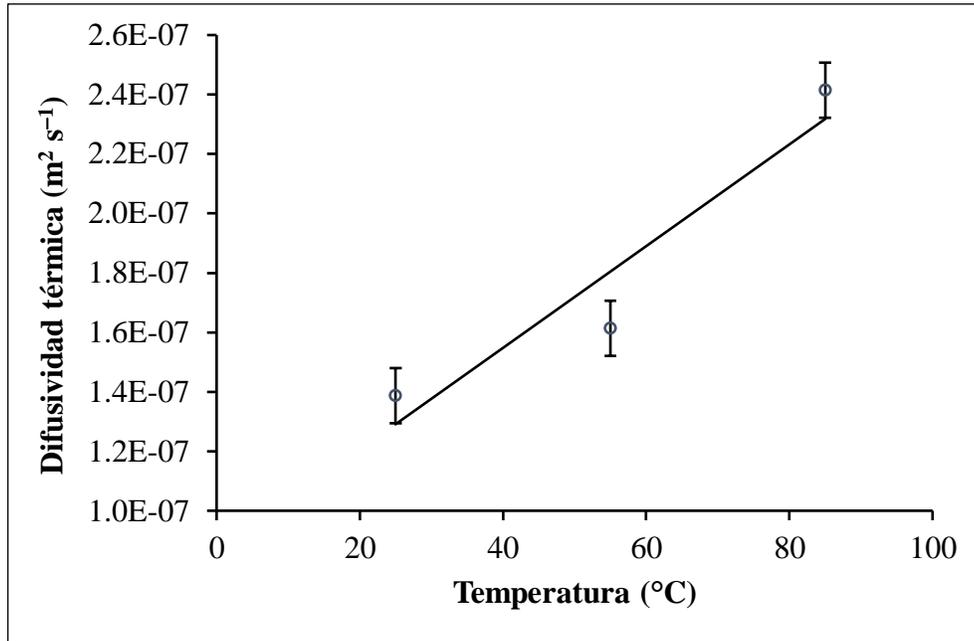


Figura 13. Difusividad térmica (α) para rodajas de chayote en función de la temperatura (LSD = $1.85 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

Se observó que la difusividad térmica aumentó de manera lineal al incrementarse la temperatura de trabajo, lo cual concuerda con lo reportado en brócoli por Iribe-Salazar y col (2015) quienes observaron que al incrementar la temperatura de procesamiento, la difusividad térmica aumenta de manera lineal.

Singh (1982) señala que la difusividad relaciona la velocidad de flujo de calor con el gradiente de temperaturas a través de la densidad y el calor específico del alimento, luego ésta también será influenciada principalmente por la temperatura.

Alvarado (1994) indica que la variación de difusividad térmica se debe a las características físicas de las frutas y compactación de las muestras.

4 Capacidad calorífica específica (C_p)

La **Figura 14** presenta el gráfico correspondiente a la capacidad calorífica específica de chayote a diferentes temperaturas. La C_p aumentó linealmente al elevarse la temperatura encontrándose en un rango de 3941 a 3994 J kg⁻¹ K⁻¹, sin diferencia significativa entre ellos, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.96 y el modelo de predicción obtenido fue:

$$C_p = 3921.5 + 0.8934T$$

Alvarado (1994) halló una capacidad calorífica de 3943 J kg⁻¹ K⁻¹ para pulpa de melón a temperatura ambiente, fruta de la familia de las *Cucurbitaceae*, Alzate (2003) reportó capacidad calorífica específica de 3640 J kg⁻¹ K⁻¹ y 3700 J kg⁻¹ K⁻¹ para papa y zanahoria respectivamente a 25 °C, asimismo, Moraga y col (2011) hallaron una C_p de 3894 J kg⁻¹ K⁻¹ en durazno a temperatura ambiente.

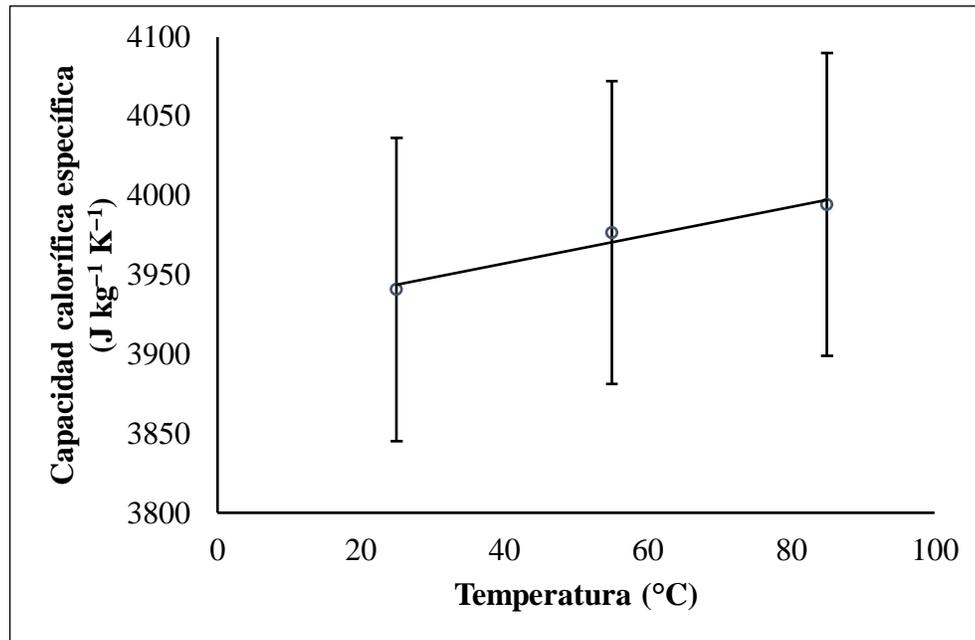


Figura 14. Capacidad calorífica específica (C_p) para rodajas de chayote en función de la temperatura (LSD = $191 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

Moreira (2018) obtuvo una C_p para chayote a temperatura ambiente de $3428 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, la cual es inferior a lo encontrado en este estudio para chayote a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que puede deberse a la metodología empleada.

Espinoza-Guevara y col (2010) señalaron un comportamiento similar al obtenido en este trabajo al observar que la capacidad calorífica específica aumenta linealmente sin diferencia significativa al incrementar la temperatura.

Las diferencias pueden deberse a las condiciones de preparación de las muestras, humedad y particularmente la temperatura a la que se realizó la medición, factor muy importante para la variación de la C_p de frutas (Alvis y col 2012). Alvarado (2014) menciona que conforme se incrementa el contenido de sólidos solubles en la pulpa de la fruta, la capacidad calorífica específica decrece; a la vez, la capacidad calorífica específica aumenta al incrementar el contenido de humedad del alimento.

5 Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

En las **Figuras 15** y **16** se presentan los gráficos utilizados para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de cocción (calentamiento) y el enfriamiento en aire, respectivamente.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) en el calentamiento fue de $367.6 \pm 9.7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Manrique (2002) reportó coeficientes típicos para h en un intervalo de 50 a $1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para procesos de convección en líquidos, Mendoza y Herrera (2012) señalaron coeficientes convectivos entre 214 y $230 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ al escaldar papas a 80 y $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

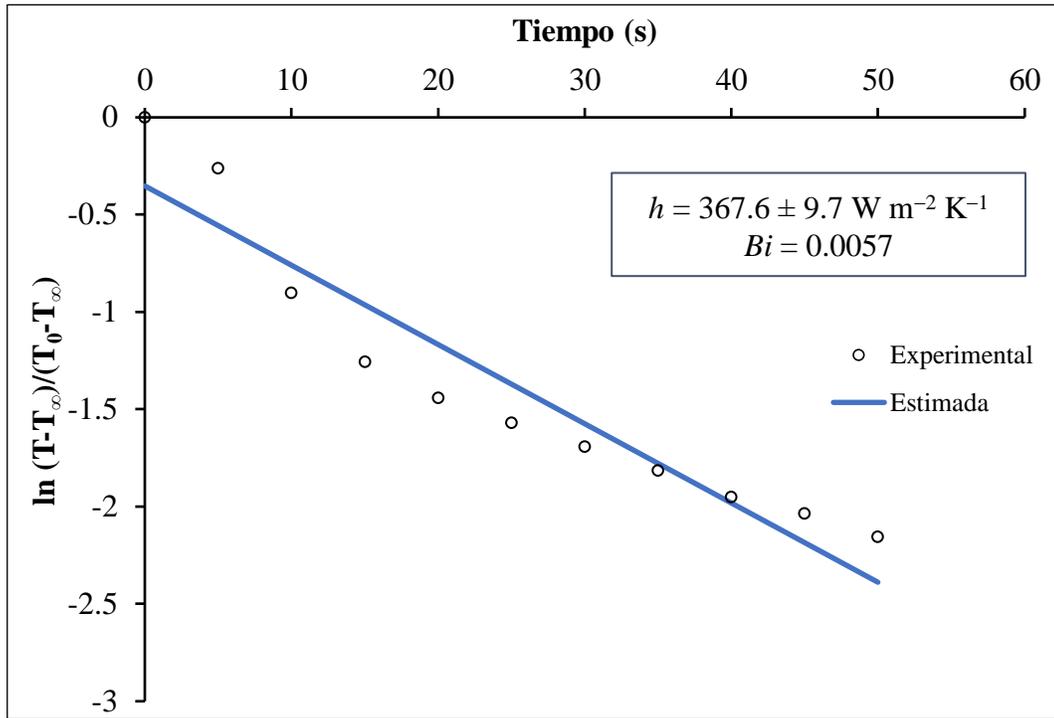


Figura 15. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de cocción a 65 °C (calentamiento).

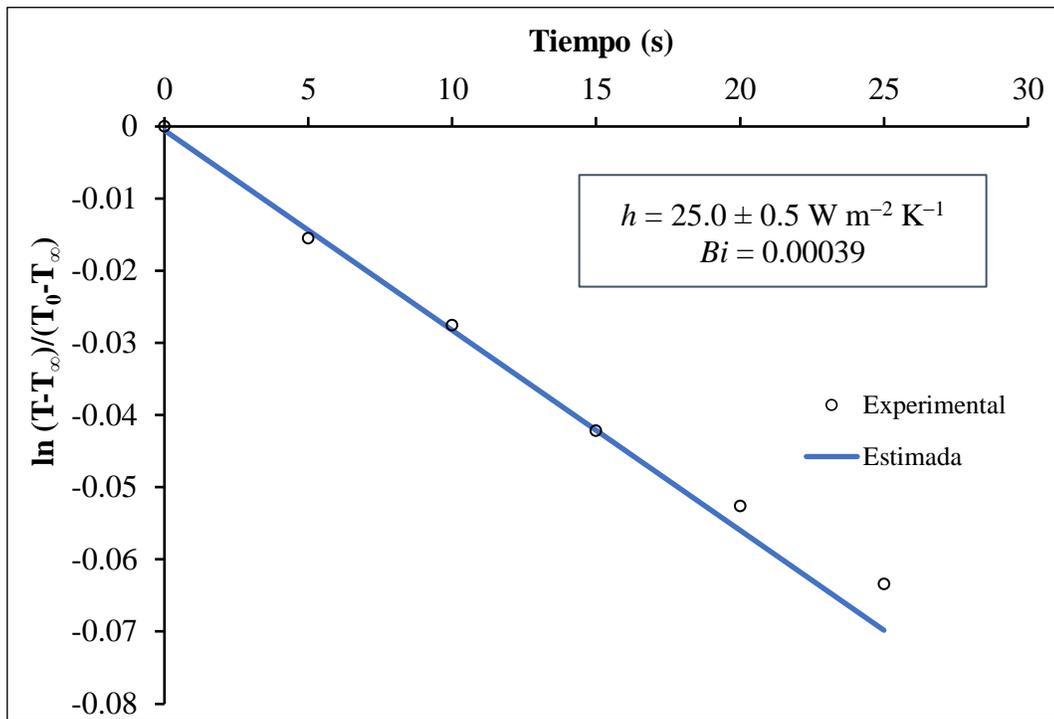


Figura 16. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el enfriamiento en aire a 20 °C.

Vidaurre-Ruiz y Castañeda-Muñoz (2014) trabajaron con calabaza en cubos y obtuvieron un intervalo de coeficiente convectivo de transferencia de calor de 1000 a 4000 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ a temperatura de 20 a 90 °C, lo cual resultó superior a lo encontrado en este estudio. Avilez-Montes y col (2016) encontraron un intervalo de h de 382.5 a 567.0 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ para temperaturas de 70 a 90 °C al trabajar con mora de castilla. Madera y col (2017) estudiaron calabaza cortada en triángulos y reportan h de 390, 455 y 535 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ para temperaturas de 70, 80 y 90 °C respectivamente, siendo ligeramente mayor a lo encontrado en este trabajo, lo cual era de esperar ya que se trabajó con una temperatura inferior.

Las variaciones en el coeficiente convectivo de transferencia de calor pueden deberse a la velocidad del fluido, la geometría del sistema empleado, así como al diferencial de temperatura con el que se trabajó.

Para el proceso de enfriamiento el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) fue de $25.0 \pm 0.5 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$. Kreith y col (2012) reportan un coeficiente convectivo de transferencia de calor para el aire de $23.3 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ lo cual resulta similar a lo encontrado en esta investigación.

F SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

En la **Figura 17** se muestra el modelo tridimensional de la rodaja de chayote creada mediante el método de elemento finito (MEF) con las medidas de la rodaja experimental y la posición de los nodos para simular las historias de temperatura, el nodo A se encuentra en las coordenadas $x = 0.05028 \text{ m}$, $y = 0.04607 \text{ m}$ y $z = 0.000633 \text{ m}$ mientras que las coordenadas para el nodo B fueron $x = 0.05651 \text{ m}$, $y = 0.03299 \text{ m}$ y $z = 0.000633 \text{ m}$.

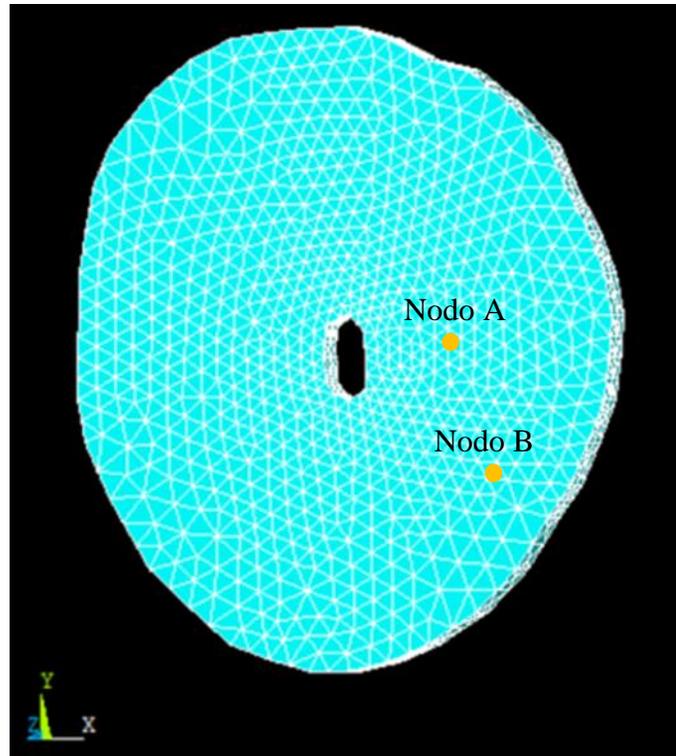


Figura 17. Modelo tridimensional de una rodaja de chayote mediante el método de elemento finito (MEF).

En la **Figura 18** se muestran los perfiles de temperatura, en los que es posible apreciar la gama de colores que va desde el rojo mostrando los sitios más calientes, hasta el azul fuerte, que presenta los lugares más fríos localizados en el centro de la hortaliza.

G VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

En la **Figura 19** se presentan las historias de temperatura obtenidas mediante solución analítica para placa infinita correspondiente al nodo A de la rodaja de chayote donde se consideran propiedades termofísicas constantes (a 25, 55 y 85 °C); al compararlas con la experimental se encontraron coeficientes de determinación (R^2) de 0.928, 0.947 y 0.994, respectivamente. En dicha Figura también se observa la historia de temperatura estimada con el método de elemento finito (MEF) al considerar propiedades termofísicas dependientes de la temperatura; comparada con la experimental se obtuvo un R^2 de 0.997. En la **Figura 20** se observan las historias para el nodo B a partir de solución analítica para placa infinita (propiedades termofísicas constantes a 25, 55 y 85 °C) comparadas con la experimental se obtuvo R^2 de 0.956, 0.970 y 0.993, respectivamente. Al comparar la estimación de la historia de temperatura con MEF considerando propiedades termofísicas en función de la temperatura y la experimental dio un R^2 de 0.995. Los ajustes se consideraron adecuados ya que el coeficiente de determinación R^2 fue mayor a 0.92.

Mendoza y Herrera (2012) realizaron estimaciones adecuadas con una solución analítica para el escaldado de papas a 80 y 90 °C, demostrando que es posible obtener buenas predicciones con una solución analítica como en este estudio.

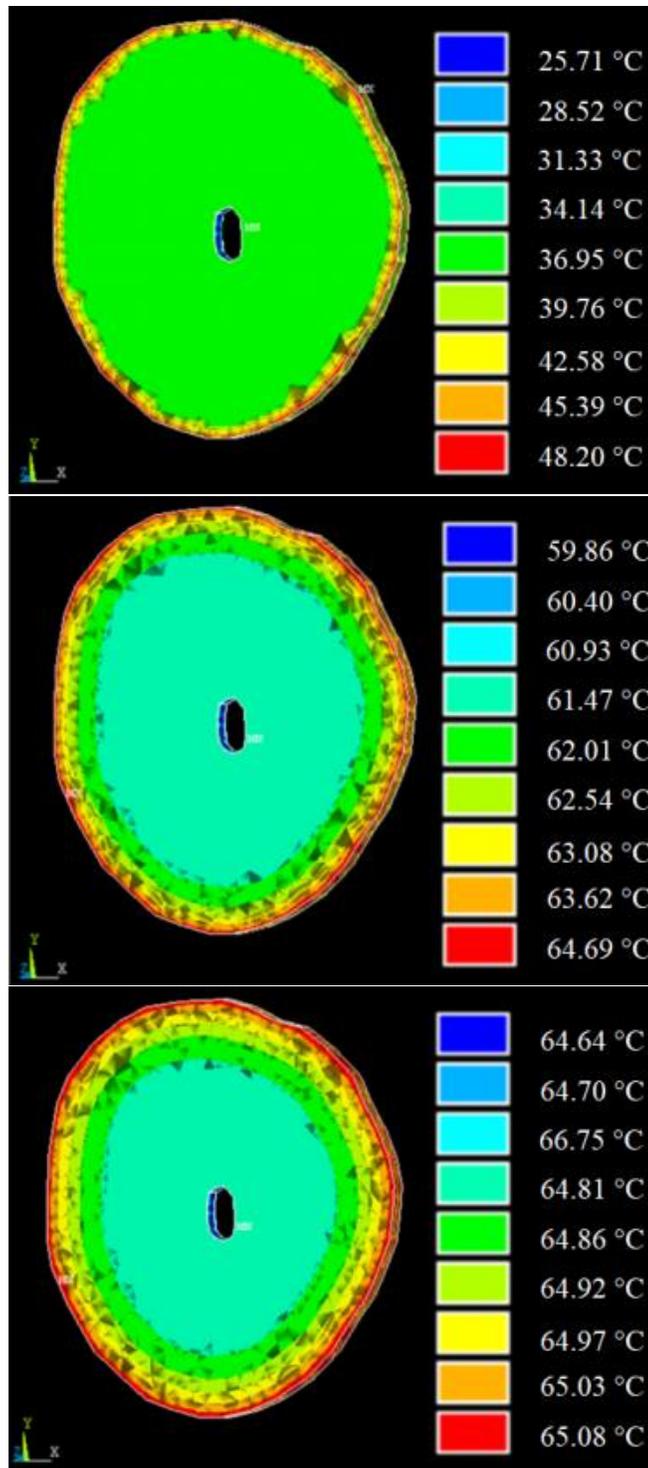


Figura 18. Perfiles de temperatura de la rodaja de chayote utilizando el método de elemento finito (MEF).

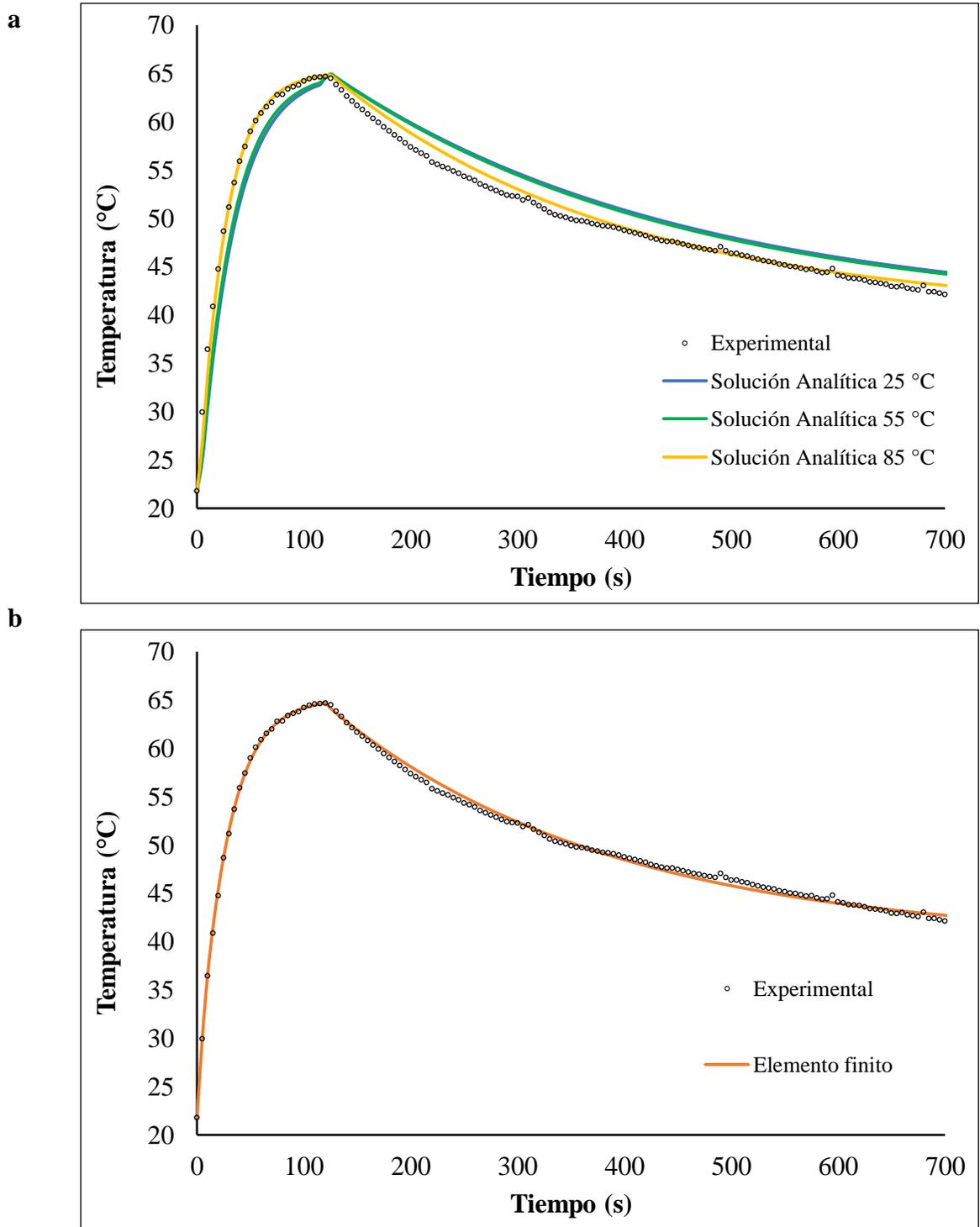


Figura 19. Historias de temperatura para el nodo A de la rodaja de chayote estimada con (a) solución analítica para placa infinita y (b) método de elemento finito, comparadas con la experimental.

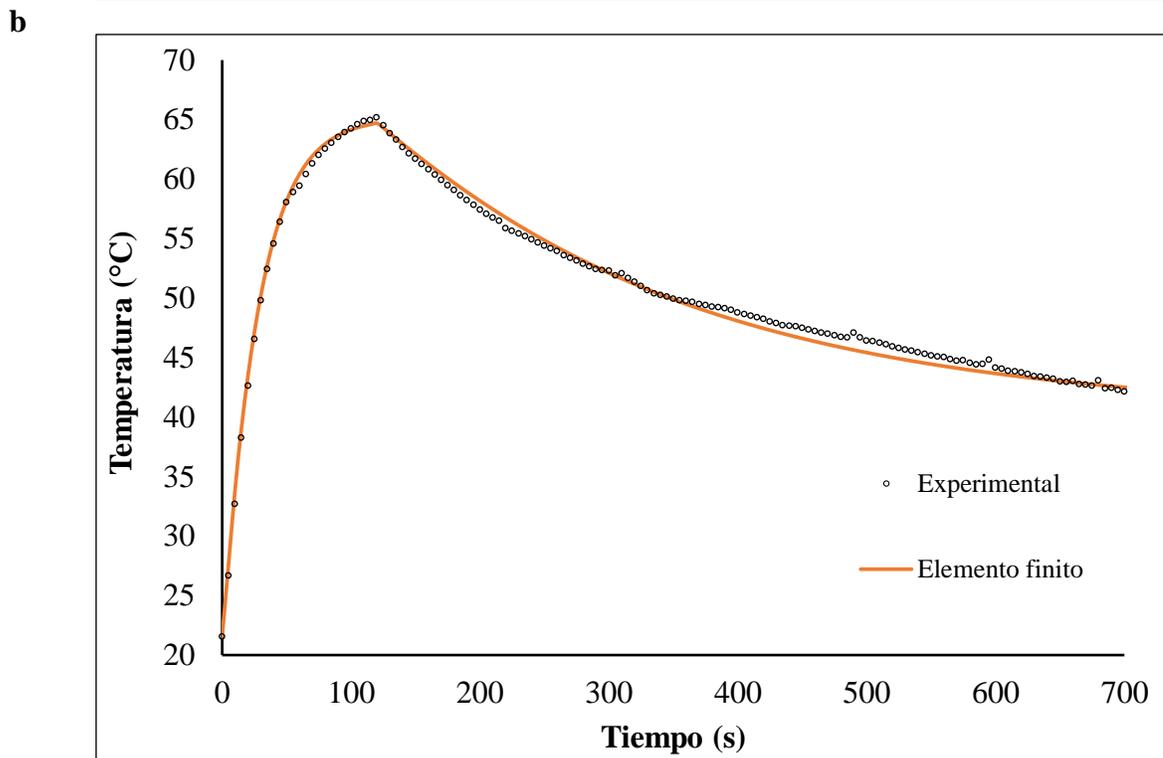
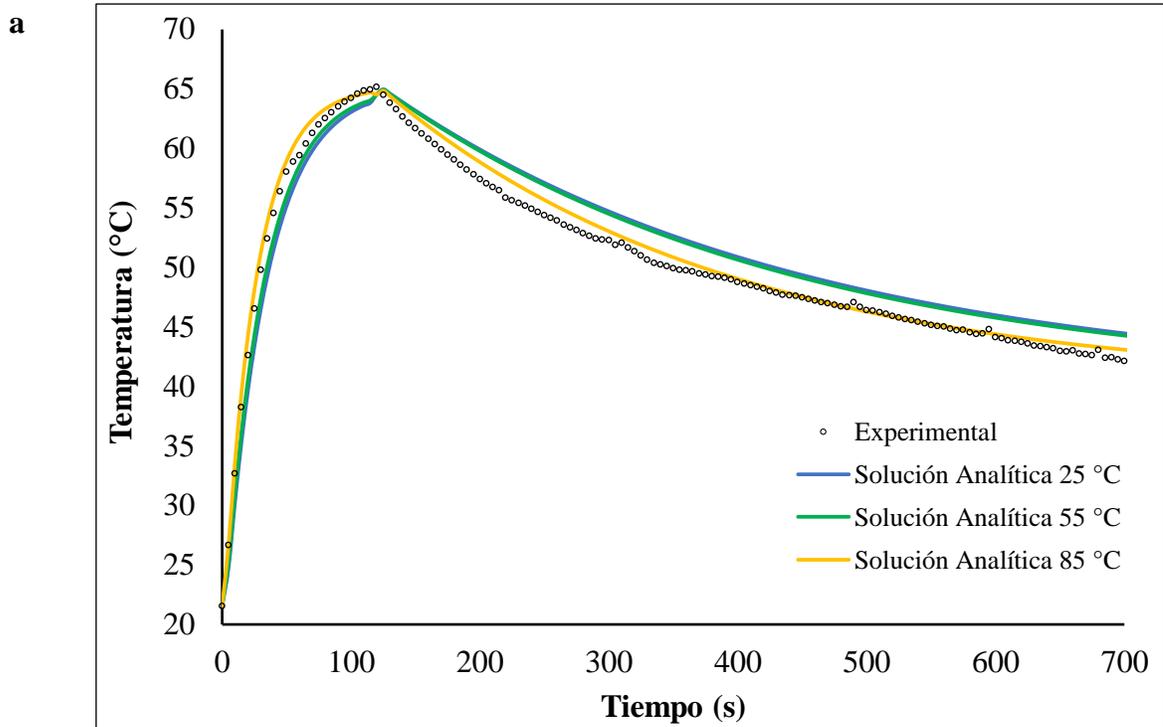


Figura 20. Historias de temperatura para el nodo B de la rodaja de chayote estimada con (a) solución analítica para placa infinita y (b) método de elemento finito, comparadas con la experimental.

Diversos autores han realizado simulaciones satisfactorias con el método de elemento finito (MEF), Vidaurre-Ruiz y Castañeda-Muñoz (2014) realizaron una simulación de transferencia de calor con el programa Autodesk® Simulation Multiphysics para calentamiento de calabaza a 90 °C, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.915. Asimismo, Avilez-Montes y col (2016) llevaron a cabo simulaciones con elemento finito para el escaldado de mora de castilla a 70, 80 y 90 °C obteniendo ajustes adecuados.

En este trabajo se verificó que las mejores predicciones se obtienen con la simulación mediante elemento finito al trabajar con los parámetros termofísicos, conductividad térmica, densidad aparente y capacidad calorífica específica dependientes de la temperatura, con un coeficiente convectivo de transferencia de calor adecuado.

H PREDICCIÓN DE LA ACTIVIDAD REMANENTE DE PEROXIDASA

1 Predicción de la actividad remanente de peroxidasa

En la **Figura 21** se muestra el gráfico de velocidad letal (v_L), la cual fue calculada a partir de la historia de temperatura simulada con el MEF para el nodo A. Se utilizó un tiempo de reducción decimal ($D_{70\text{ °C}}$) de 2 min y una constante de resistencia térmica (z) de 13.9 °C para peroxidasa reportados por López-Díaz (2018). Con dichos parámetros se predijo la actividad remanente de peroxidasa (31.06 %) al simular el calentamiento en agua de rodajas de chayote a 65 °C durante 2 min y posteriormente el enfriamiento en aire a 20 °C por 10 min.

2 Validación de la predicción de actividad remanente de peroxidasa

En la **Figura 22** se muestra una representación de la sección de chayote que fue considerada para obtener experimentalmente la actividad remanente de peroxidasa para la validación.

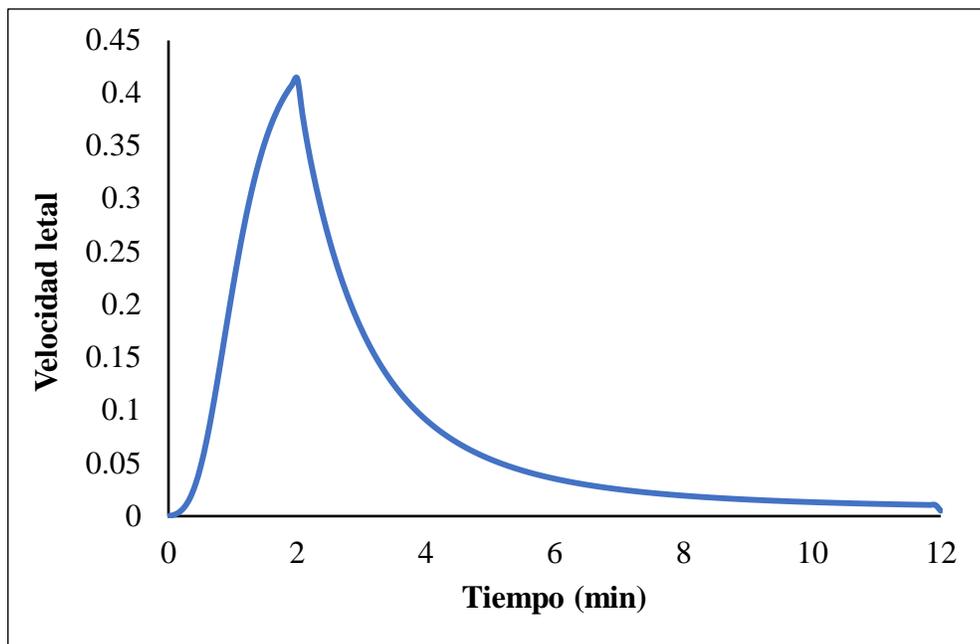


Figura 21. Gráfico de velocidad letal para rodaja de chayote cocida.

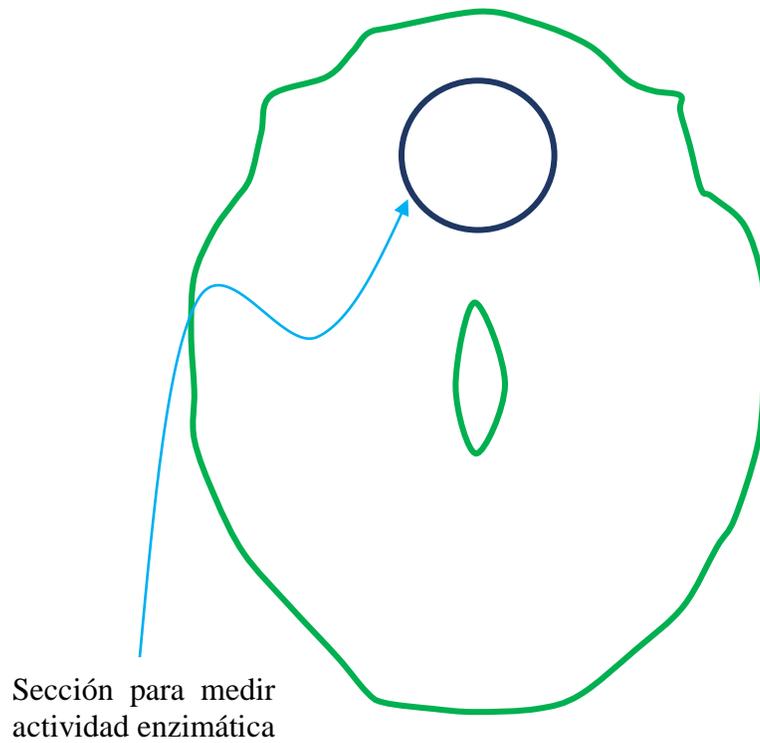


Figura 22. Representación de la sección utilizada para medir experimentalmente la actividad remanente enzimática de rodajas de chayote cocidas.

En el **Cuadro 7** se muestra la comparación de la actividad remanente de peroxidasa predicha analíticamente mediante cálculos ingenieriles y la obtenida experimentalmente. El porcentaje de actividad remanente de peroxidasa obtenido de experimentos fue 31.12 %, éste fue muy cercano al porcentaje predicho. Lo que prueba que el tiempo de reducción decimal a 70 °C y la constante de resistencia térmica reportados para peroxidasa permiten un ajuste adecuado, demostrando que la predicción resulta satisfactoria.

Cuadro 7. Actividad remanente de peroxidasa predicha y experimental para rodajas de chayote cocidas a 65 °C.

Actividad remanente de peroxidasa	
Predicha	Experimental
31.06 %	31.12 ± 4.44 %

VIII CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica de chayote fresco resultó similar a lo indicado en la literatura. El contenido de ácido ascórbico fue superior a lo reportado por la USDA. La concentración de compuestos fenólicos fue ligeramente inferior a lo encontrado por otros investigadores y la actividad enzimática de peroxidasa se halló en el rango de lo reportado para otras hortalizas.

Los modelos de retención de firmeza, diferencia total de color, retención de ácido ascórbico, retención de compuestos fenólicos y actividad remanente de peroxidasa para la cocción de rodajas de chayote fueron adecuados y reproducibles, lo que permite realizar estimaciones apropiadas de dichos parámetros en el intervalo estudiado de los factores. Las condiciones óptimas para la cocción de rodajas de chayote fueron temperatura de 88.5 °C y tiempo de 3.7 min.

Las propiedades fisicoquímicas, nutrimental, fitoquímica y enzimática del chayote cocido optimizado, contrastadas respecto al fresco, fueron diferentes, excepto el parámetro *a* de color y la acidez titulable.

Los parámetros ingenieriles a las temperaturas estudiadas estuvieron en el rango reportado para alimentos, lo que permitió simulaciones analíticas y con elemento finito satisfactorias; este último método proporcionó el mejor ajuste.

La predicción de la actividad remanente de peroxidasa se consideró satisfactoria al ser validada en forma experimental, por lo que se considera que es posible predecir adecuadamente esta actividad enzimática considerando sus parámetros termocinéticos mediante la historia de temperatura obtenida por simulación con elemento finito.

Se obtuvieron las mejores condiciones de temperatura y tiempo para la cocción de rodajas de chayote con muy buenas características de calidad, fisicoquímicas, nutrimental, fitoquímica

y enzimática y se predijo en forma satisfactoria la actividad de peroxidasa después del proceso de cocción, únicamente con cálculos de ingeniería. Esto permite estimar la actividad remanente bajo diferentes condiciones del proceso de cocción de rodajas de chayote sin necesidad de realizar la medición experimental.

IX BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Ghannam N, Crowley H. 2006. The effect of low temperatura blanching on the texture of whole processed new potatoes. *Journal of Food Engineering* 74:335-344.
- Agüero M, Ansorena M, Roura S, Del Valle C. 2007. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash. *Food Science and Technology*, 41:401-407.
- Alvarado JD. 2014. *Principios de Ingeniería Aplicados a Alimentos*. 2ª edición. Univerdidad Técnica de Ambato, Ecuador. Megagraf. 490p.
- Alvarado JD. 1998. Determinación de la madurez de frutas por medida de la densidad relativa de jugo. OEA-CONACYT. Universidad Técnica de Ambato (Ecuador).
- Alvarado JD. 1994. Propiedades físicas de frutas. IV. Difusividad y Conductividad Térmica efectiva de pulpas. *Latin American Applied Research* 24:41-47.
- Alvarado J, Martínez G, Navarrete J, Botello E, Calderon M, Jiménez H. 2009. Fenomenología de la esterilización de alimentos líquidos enlatados. *Ingeniería de Alimentos*:87-98.
- Alvis A, Caceido I, Peña P. 2012. Determinación de Propiedades Termofísicas de Alimentos en Función de la Concentración y la Temperatura empleando un Programa Computacional. *Información Tecnológica* 23(1):111-116.
- Alzate CEO. 2003. *Procesamiento de Alimentos*. 1ª edición. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 322p.
- Anthon GE, Sekine Y, Watanabe N, Barrett DM. 2002. Thermal inactivation of pectinmethylesterase, polygalacturonase and peroxidase in tomato juice. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 50:6153-6159.

- AOAC Official Methods of Analysis. 2012. Of AOAC INTERNATIONAL. 18^a ed. Estados Unidos de América: Association of Official Analytical Chemists.
- Arévalo ML, Cadena J. CHAYOTE una hortaliza con atributos nutricionales. 2016. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Disponible de: www.bibliotecahorticultura.com. Consultado el 12 de abril de 2018.
- Avendaño CH, Cadena J, Arévalo ML, Campos E, Cisneros VM, Aguirre JF. 2010. Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. México: GISEM. 47 p.
- Avilez-Montes Y, Romero-Martínez M, Ortega-Quintana FA, López-Acosta E, Pérez-Sierra O. 2016. Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el proceso de escaldado de mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth) por el método de elementos finitos. Ingeniería e Innovación 4(2):7-14.
- Azarang M, García DF. 1996. Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos. Cd. de México, México: McGraw-Hill, 282p.
- Azizah AH, Wee KC, Azizah O, Azizah M. 2009. Effect of boiling and stir frying on total phenolics, carotenoids and radical scavenging activity of pumpkin (*Cucurbita moscheto*). International Food Research Journal 16:45-51.
- Bancomext, SNC. 2004. Exportaciones de México al mercado hispano de E.U. Periódico El Financiero, México, D.F. Sección Economía, 8 de junio, 2004. P18.
- Barbosa DP, Ribeiro IC, Campos LM, Oestreicher EG, Berezuk M, Cardozo-Filho L. 2010. Peroxidase activity in *Spondias dulcis*. Acta Scientiarum. Technology 32: 341-345.

- Bas D, Boyacı İH. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78(3):836-845.
- Beaulieu JC, Gorny JR. 2002. Fresh-cut Fruits. In: Gross KC, Wang CY, Salveit M (editores). *The comercial storage of fruits, vegetables and florist and nursery stocks. Agricultural Handbook. Number 66.*
- Blach D, Donado J, Pinzón M. 2011. Actividad de la peroxidasa y polifenoloxidasa en rodajas de carambolo (*Averrhoa carambola* L.) fresco cortado durante su almacenamiento en atmosfera modificada. *Alimentos Hoy* 19(20), 34-42.
- Cadena-Iñiguez J. 2005. Caracterización morfoestructural, fisiológica, química y genética de diferentes tipos de chayote (*Sechium edule*) [Tesis de Doctorado]. Colegio de Postgrados, Campues Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 164p.
- Cadena-Iñiguez J, Arévalo-Galarza ML. 2010. Rescatando y Aprovechando los Recursos Fitogénicos de Mesoamérica Volumen 1: Chayote. México. 20 p.
- Cadena J, Ruiz LM, Trejo C, Sánchez P, Aguirre JF, 2001. Intercambio de gases y relaciones hídricas del chayote (*Sechium edule* Sw.). *Revista Chapingo Horticultura* 7:21-35.
- Cadena J, Soto M, Arévalo M, Avendaño C, Aguirre J, Ruiz L. 2011. Caracterización bioquímica de variedades domesticadas de chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw. comparadas con parientes silvestres. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(2):45-55.
- Caracuel A. 2008. Técnicas de cocción saludables aplicables a la alimentación mediterránea. *ANALES*. 21:171-179.

- Caro-Corrales JJ. 2002. Simulación de la transferencia de calor durante el enfriamiento de galletas utilizando el método de Monte Carlo. [Tesis de doctorado]. Cd. de México, México. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- Carrera GF. 1998. Diseño y análisis de experimentos industriales. Universidad Iberoamericana.
- Carslaw HS, Jaeger JC. 1959. Conduction of Heat in solids, 2a ed., Oxford University Press, Nueva York, NY.
- Castro JM, Toledo AM, Rodríguez B, Perdomo A, Rodríguez EM, Díaz C. 2015. Caracterización morfológica y composición química de chayotas (*Sechium edule*) cultivadas en las Islas Canarias (España). Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 65:243-253.
- Cengel YA. 2007. Transferencia de calor y masa. 3ª edición. México. McGraw-Hill. 901p.
- Chao P, Lin S, Lin K, Liu Y, Hsu J, Yang C, Lai J. 2014. Antioxidant Activity in Extracts of 27 Indigenous Taiwanese Vegetables. Nutrients 6:2115-2130.
- Cisneros-Solano V. 2016. Despigmentación del chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw en Actopan, Veracruz, México. Agroproductividad 9(8):71-77.
- Coss BR. 1999. Simulación, un Enfoque Práctico. Limusa, Cd. de México, México.
- Cruz R, Vieira M, Silva C. 2008. Effect of heat and thermosonication treatments on watercress (*Nasturtium officinale*) vitamin C degradation kinetics. Innovative Food Science and Emerging Technologies 9(4):483-488.
- Davis WR. 1980. Hot Wire Method for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Materials. British Ceramic Transactions Journal 79:231-253.

- Del Ángel OA, León E, Vela G, Rojas JO, Gómez MA, García HS. 2017. Lipoxygenase activity associated to fruit ripening and senescence in chayote (*Sechium edule* Jacq. Sw. Cv. “virens levis”). *Journal of Food Biochemistry*. 42.
- Diré G, Lima E, Gómes M, Bernardo-Filho M. 2003. The effects of a chayote (*Sechium edule*) extracts (decoct and macerated) on the labelling of blood elements with technetium-99m and on biodistribution of the radiopharmaceutical sodium pertechnetate in mice: an *in vitro* and *in vivo* analysis. *Pakistan Journal of Nutrition* 2(4):221-227.
- Dürüst N, Sümergen D, Dürüst Y. 1997. Ascorbic acid and Element Contents of Foods of Trabzon (Turkey). *Journal Agricultural and Food Chemistry* 45:2085-2087.
- Encarnación S. 2006. La producción y precios del chayote en México [Tesis de Licenciatura]. Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 60p.
- Espinoza-Guevara R, Caro-Corrales J, Ordorica-Falomir C, Zazueta-Morales J, Vega-García M, Cronin K. 2010. Thermophysical properties of pulp and rind of papaya cv. Maradol. *International Journal of Food Properties* 13(1):65-74.
- Gajar AM, Badrie N. 2001. Processing and quality Evaluation of a Low-Calorie Christophene Jam (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz). *Journal of Food Science* 67(1):341-346.
- Ganjloo A, Rahman RA, Osman A, Bakar J, Bimakr M. 2011. Kinetics of crude peroxidase inactivation and color changes of thermally treated seedless guava (*Psidium guajava* L.) *Food Bioprocess Technology* 4:1442-1449.
- Geankoplis CJ. 1998. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3ª edición. México. CECSA. 1007p.

- Goncalves EM, Pinheiro J, Abreu M, Brandao TRS, Silva CLM. 2010. Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. *Journal of Food Engineering* 97:574-581.
- Goncalves E, Pinheiro J, Abreu M, Brandao T, Silva C. 2007. Modelling the kinetics of peroxidase inactivation, color and texture changes of pumpkin (*Cucurbita máxima* L.) during blanching. *Journal of Food Engineering* 8:693-701.
- Hillier FS, Lieberman GJ. 1989. Simulación, Cap. 23. En: *Introducción a la Investigación de Operaciones*. 2^a ed, Cd. de México, México: McGraw-Hill. 312p,
- Himmelblau DM, Birschoff KB. 2004. *Análisis y simulación de procesos*. New York: REVETÉ, S.A. 756p.
- 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.
- 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.
- Kreith F, Manglik RM, Bohn MS. 2011. *Principles of heat transfer*. 7^a Ed. USA. Cengage Learning. 696p.
- Lira R. 1996. Chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw. Promoting the conservation and use of under utilized and neglected crops. Institute of plants Genetics and Crops Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy. p. 43. Disponible de: <http://www.ipgri.cgiar.org//publications/>.

- López-Díaz A. 2018. Determinación de los parámetros termocinéticos de Peroxidasa en brócoli (*Brassica oleracea* L.) cv. Itálica [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 118p.
- López-López M, Vega-Espinoza A, Ayón-Reyna L, López-Valenzuela J, Vega-García M. 2013. Combined effect of hot water dipping treatment, N-acetylcysteine and calcium on quality retention and enzymatic activity of fresh-cut Apple. *Journal of Food Agriculture and Environment* 11(2):243-248.
- Madera SM, Ortega-Quintana FA, López EA, Pérez OA. 2017. Determinación del Coeficiente Convectivo del Proceso de Escaldado de Zapallo (*Cucurbita maxima*). *Información Tecnológica* 28(3):59-66.
- Magee TRA. 1995. Measurement of Thermal Diffusivity of Potato, Malt Bread and Wheat Flour. *Journal of Food Engineering* 25:223-232.
- Manrique V. 2002. Transferencia de calor. 2ª Ed. México: OXFORD. 304p.
- Marangoni AG, Jackman RL, Stanley DW. 1995. Chilling associated softening of tomato fruits is related to increased PME activity. *Journal of Food Science* 60:1277-1281.
- Maroulis ZB, Saravacos GD, Krokida MK, Panagiotou NM. 2002. Thermal conductivity prediction for foodstuffs: effect of moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties* 5(1):231-245.
- Mejía-Doria C, Duque-Cifuentes A, García-Alzate L, Giraldo-Castaño Y, Padilla-Sanabria L. 2016. Caracterización fisicoquímica de geometrías de cidra (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) impregnadas a vacío con maracuyá. *Agronomía Colombiana* 34:S1211-S1214.

- Mendoza R, Herrera A. 2012. Cinética de inactivación de la enzima peroxidasa, color y textura en papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo *phureja*) sometida a tres condiciones de escaldado. *Información Tecnológica* 23(4):73-82.
- Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Cuevas-Rodríguez EO, Ramírez-Wong B, Reyes-Moreno C. 2006. The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science and Technology* 41(7):727-736.
- Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Camacho-Hernández IL, Rouzaud-Sandez O. 2002. Optimization of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L) into a useful product. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82(14):1718-1728.
- Mohsenin, N.N. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*. New York: Gordon and Breach, 407p.
- Moncada LM, Gualdrón L. 2006. Retención de nutrientes en la cocción, freído y horneado de tres alimentos energéticos. *Revista de investigación* 6:179-187.
- 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 Journal* 152: 508-515.

- Moraga N, Zambra C, Torres P, Lemus-Mondaca R. 2011. Modelado de dinámica de fluidos y transferencia de calor y masa en procesos agroalimentarios por método de volúmenes finitos. *Dyna* 78(169):140-149.
- Morales-Blancas E, Chandia V, Cisneros-Zevallos L. 2002. Thermal Inactivation Kinetics of Peroxidase and Lipoxygenase from Broccoli, Green Asparagus and Carrots. *Journal of Food Science* 67:146-154.
- Moreira RS. 2018. Caracterización morfológica y composición fisicoquímica de la fruta Cidrayota (*Sechium edule*) de la variedad *virens levis* cultivada en los cantones Piñas (El Oro) y Baños (Tungurahua) [Tesis de Licenciatura]. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. 90p.
- Muftugil N. 1986. Effect of different types of blanching on the color and the ascorbic acid and chlorophyll contents of green beans. *Journal of Food Processing and Preservation* 10(1):69-76.
- Murakami EG, Sweat VE, Sastry SK, Hayakawa K, Datta A. 1996. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. *Journal of Food Science* 27:109-123.
- Myers R, Montgomery DC. 1971. Response surface methods. Allyn-Bacon: Boston, MA, USA.
- Nieto C. 2014. Técnicas de cocción: sabor, color, textura y nutrientes a buen recaudo. *Farmacia profesional. ELSEVIER.* 28:15-19.

- Oladunjoye M, Sanuade O. 2012. Thermal diffusivity, thermal effusivity and specific heat of soils in olorunsogo power plant, southwestern Nigeria. *International Journal of Recent Research and Applied Studies* 13(2):502-521.
- Pellegrini N, Chiavaro E, Gardana C, Mazzeo T, Contino D, Gallo M, Riso P, Fogliano V, Porrini M. 2010. Effect of different cooking methods on color, phytochemical concentration, and antioxidant capacity of raw and frozen brassica vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(7):4310-4321.
- 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.
- Peña M, Sosa M, Cerón A. 2017. Determinación de fenoles, flavonoides y parámetros fisicoquímicos en chayote (*Sechium edule*) procesado térmicamente. *Jóvenes en la Ciencia* 3(2):101-106.
- Pérez JM, Cerecero R, Andrade I, Ragazzo JA, Luna G. 2008. Optimization of Vegetal Pear Drying Using Response Surface Methodology. *Drying Technology* 26:1401-1405.
- Rao MA, Barnard J, Kenny JF. 1975. Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Process Variety Squash and White Potatoes. *Transactions of the ASAE* 18(6):1188-1192.
- Rapusas RS, Driscoll RH. 1995. Thermophysical properties of fresh and dried white onions slices. *Journal of Food Engineering* 24:149-174.

- Ricse A, Cueva N. 2017. Comportamiento cinético de la actividad de peroxidasa y color en papas (*Solanum tuberosum*) de dos variedades; Canchán y Perricholi, sometidas a tratamiento térmico. [Tesis de Licenciatura]. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú. 43-46.
- Rivera-López J, Vázquez-Ortiz F, Ayala-Zavala J, González-Aguilar G. 2005. Efecto del corte y la temperatura de almacenamiento en la calidad de papaya fresca cortada (*Carica papaya* L. cv. “maradol”). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha 6(2):83-94.
- Robinson DS. 1991. Peroxidases and catalases in foods. En: Robinson DS, Eskin NAM. Oxidative enzymes in foods. Amsterdam: Elsevier Applied Science. p. 1-47.
- Schoeninger V, Coelho SRM, Christ D, Sampaio SC. 2014. Processing parameter optimization for obtaining dry beans with reduced cooking time. Food Science and Technology 56:49-57.
- Selman J. 1994. Vitamin retention during blanching of vegetables. Food Chemistry 49(2):137-147.
- Shiga TM, Goncalves FH, Carpita NC, Lajolo FM, Cordenunsi BR. 2015. Polysaccharide composition of raw and cooked chayote (*Sechium edule* Sw.) fruits and tuberous roots. Carbohydrate polymers 130:155-165.
- SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2016. Disponible de: <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 11 de abril de 2018
- Singh RP. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology 36(2):86-91.

- Sweat VE. 1986. Thermal Properties of Foods. Capítulo 2 en: Engineering Properties of Foods, MA. Rao y SSH Rizvi (Ed.), NY. Marcel Dekker. P 49-87.
- Swensson J. 2007. Banco de datos de Propiedades Termofísicas de productos hortícolas. Universidad Estatal de Campinas (Brasil). p76.
- Tocci AM, Mascheroni RH. 2008. Some thermal properties of fresh and osmotically dehydrated kiwifruit above and below the initial freezing temperature. Journal of Food Engineering 88:20-27.
- Turkmen N, Sari F, Velioglu S. 2005. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. Food Chemistry 93:713-718.
- USDA U.S. Department of Agriculture. 2016. Disponible de: www.usda.gov. Consultado el 10 de abril de 2018.
- Vidaurre-Ruiz J, Castañeda-Muñoz J. 2014. Determinación de los parámetros de transferencia de calor durante el calentamiento del loche (*Cucurbita moschata Duchesne*) utilizando soluciones numéricas y analíticas. Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación 1(2):94-105.
- Wang S, Tang J, Cavalieri RP. 2001. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments. Postharvest Biology and Technology 22:257-270.
- 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.
- Yamaguchi T, Mizobuchi T, Kajikawa R, Kawashima H, Miyabe F, Terao J, Takamura H, Matoba T. 2001. Radical-Scavenging activity of vegetables and the effect of cooking on their activity. Food Science and Technology Research 7(3):250-257.

- Zarabia-Salazar A, Castro-Soto MT, Castro-Urias M. 2005. Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería Química [Tesis de Licenciatura]. Culiacán, Sinaloa, México. Universidad Autónoma de Sinaloa. 304p.
- Zhang Z, Pang X, Xuwu D, Ji Z, Jiang Y. 2005. Role of peroxidase in anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp. *Food Chemistry* 90(1):47-52.
- Zhang D, Hamazu Y. 2004. Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of brócoli and their changes during conventional and microwave cooking. *Food Chemistry* 88:503-509.

ABREVIATURAS

$-dT/dx$	Gradiente de temperatura, ($K m^{-1}$)
A	Área, (m^2)
a	Parámetro de color de verde a rojo
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
AT	Acidez titulable
b	Parámetro de color de azul a amarillo
Bi	Número de Biot, (adimensional)
$C.V.$	Coefficiente de variación
CF	Compuestos fenólicos
Col	Colaboradores
C_p	Capacidad calorífica específica, ($J kg^{-1} K^{-1}$)
D_T	Tiempo de reducción decimal
F	Letalidad
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ($W m^{-2} K^{-1}$)
k	Conductividad térmica, ($W m^{-1} K^{-1}$)
L	Longitud, (m)
L^*	Luminosidad
L	Espesor, (m)
LOF	Falta de ajuste (Lack of fit)
LSD	Diferencia mínima significativa (Least Significant Difference)
m	Masa
M_c	Masa constante de la cápsula
MEF	Método de elemento finito
$MEqA$	Miliequivalente del ácido cítrico
Mm	Masa de la muestra
Mm_f	Masa de la muestra fresca
Mm_s	Masa de la cápsula con la muestra seca
N	Normalidad
p	Significancia mínima
POD	Peroxidasa
Q	Densidad del flujo de calor, ($W m^{-2}$)
Q_L	Calor suministrado por unidad de longitud ($W m^{-1}$)

R^2	Coefficiente de determinación
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SST	Sólidos solubles totales
Sw	Swartz
T	Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$)
t	Tiempo, (min)
t	Toneladas
T_{∞}	Temperatura del medio de calentamiento, ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	Temperatura de la superficie, ($^{\circ}\text{C}$)
USDA	United States Department of Agriculture
V	Volumen, (mL)
VG	Volumen de NaOH gastado, (mL)
v_L	Velocidad letal
z	Constante de resistencia térmica
α	Difusividad térmica, ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
ΔE	Diferencia total de color
ε	Coefficiente de extinción molar, ($\text{mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
ρ	Densidad, (kg m^{-3})

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos, nutrimental, fitoquímico y enzimático en la cocción de rodajas de chayote a las diferentes temperaturas y tiempos descritos en la metodología.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	% <i>RF</i>	ΔE	% <i>RAA</i>	% <i>RCF</i>	% <i>ARP</i>
81.5	2.6	79.2	5.9	61.0	62.3	73.5
88.5	2.6	68.3	8.3	52.8	63.3	56.2
81.5	5.4	70.5	6.8	43.9	58.9	57.3
88.5	5.4	57.5	8.9	39.2	64.1	32.7
80.0	4.0	73.7	5.5	51.9	74.6	72.7
90.0	4.0	59.6	9.0	46.6	81.0	35.0
85.0	2.0	83.0	6.0	63.4	47.5	56.9
85.0	6.0	62.9	7.7	40.1	51.0	39.2
85.0	4.0	68.3	7.5	55.4	70.6	48.5
85.0	4.0	70.7	7.3	50.1	71.6	52.3
85.0	4.0	72.1	7.4	52.8	71.9	55.4
85.0	4.0	66.7	6.9	50.1	75.4	56.2
85.0	4.0	66.7	7.5	48.7	72.4	49.2